



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

Μεταπτυχιακή Εργασία

ΤΙΤΛΟΣ

"Κατασκευή μηχανής επιλεκτικής τήξης-πυροσυσσωμάτωσης με laser (SLS-SLM): Έλεγχος συστήματος εναπόθεσης σκόνης, έλεγχος και παραμετροποίηση διάταξης laser "

Επαμεινώνδας Κυριακόπουλος

Επιβλέπων Καθηγητής: Γεώργιος Χριστόφορος Βοσνιάκος

ΑΘΗΝΑ 2016

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής διατριβής είναι η κατασκευή μιας μηχανής επιλεκτικής τήξης/πυροσυσσωμάτωσης με laser (SLS-SLM). Πιο συγκεκριμένα, πραγματεύεται τη λειτουργία του μικροελεγκτή Arduino, των βηματικών κινητήρων της μηχανής καθώς και του συστήματος laser.

Αρχικά παρουσιάζεται ο μικροελεγκτής Arduino, όπου δίνεται έμφαση σε λειτουργίες που χρησιμοποιήθηκαν κατά την υλοποίηση του συστήματος. Στη συνέχεια γίνεται θεωρητική ανάλυση των βηματικών κινητήρων και ακολουθεί ανάλυση της λειτουργίας των δύο βηματικών κινητήρων της μηχανής: Ένας για τη μετακίνηση του συστήματος απλώματος σκόνης και ένας για την περιστροφή του ράουλου κατά τη μετακίνηση του συστήματος απλώματος σκόνης. Ύστερα γίνεται θεωρητική μελέτη της λειτουργίας των laser, εστιάζοντας στα παλμικά laser. Επιπλέον, αναλύεται το συγκεκριμένο σύστημα laser που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της εργασίας, ενώ γίνεται και παρουσίαση του λογισμικού εποπτείας της λειτουργίας του laser. Τέλος, παρουσιάζεται η συνολική υλοποίηση της διάταξης ελέγχου του συστήματος απλώματος σκόνης και laser και η δοκιμή που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια ελέγχου της ορθής λειτουργίας της μηχανής, καθώς και οι μελλοντικές επεκτάσεις.

Λέξεις κλειδιά: Επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με laser, επιλεκτική τήξη με laser, Ταχεία κατασκευή, Προσθετική κατασκευή, βηματικοί κινητήρες, παλμικά laser, διάταξη ελέγχου

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

Abstract

The subject of this diploma thesis is the construction of a selective melting/laser-sintering machine (SLS-SLM). More specifically, the operation of the microcontroller Arduino, the stepper motors of the machine and the laser system are discussed.

Initially, the microcontroller Arduino is presented, where emphasis is given on functions which were used for the system implementation. Then, theoretical analysis of stepper motors, followed by analysis of the operation of the two stepper motors used in the powder spreading application of the machine is made, i.e. one for moving the powder spreading system and another one for rotating the roller during the movement of the powder spreading system. After, a theoretical study of laser operation focusing on pulsed laser is made. Furthermore, the particular laser system used is analyzed, while a presentation of the laser operation control software is made. Ultimately, the overall implementation of powder spreading and laser control device and the test which was carried out within the check of the correct operation of the machine are presented, as well as the future extensions.

Keywords: Selective laser sintering, selective laser melting, Rapid manufacturing, Additive manufacturing, stepper motors, pulsed laser, control device

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	9
1.1 Ταχεία κατασκευή (Rapid manufacturing)	9
1.1.1 Διαδικασία της ταχείας κατασκευής	9
1.2 Προσθετική κατασκευή (Additive manufacturing)	11
1.3 SLS - Γενικά	11
1.4 Σκοπός εργασίας	22
1.5 Δομή εργασίας	23
Κεφάλαιο 2: Ο μικροελεγκτής Arduino	24
2.1 Εισαγωγή	24
2.2 Arduino UNO	25
2.2.1 Arduino UNO και PWM	26
Κεφάλαιο 3: Βηματικοί κινητήρες	28
3.1 Χαρακτηριστικά	28
3.2 Αρχή λειτουργίας	30
3.2.1 Διαχωρισμός με βάση τα τυλίγματα στο στάτη	31
3.2.2 Διαχωρισμός με βάση τη δομή	33
3.3 Φορτίο συνδεδεμένο με κοχλία κίνησης (leadscrew)	38
3.4 Εφαρμογή	40
3.4.1 Χαρακτηριστικά κινητήρων	40
3.4.2 Drivers και συνδέσεις	43
3.4.3 Αύξηση ταχύτητας κινητήρων	48
3.4.4 Κώδικας Arduino για την κίνηση των δύο βηματικών κινητήρων	49
3.4.5 Υπολογισμός γραμμικής κίνησης	53
Κεφάλαιο 4: Laser	55
4.1 Εισαγωγή στα laser [14]	55
4.1.1 Βασικές έννοιες-Αυθόρμητη κι εξαναγκασμένη εκπομπή, απορρόφηση	56
4.1.2 Η ιδέα του laser	58
4.2 Laser YLIA M20	62
4.2.1 Βασικά χαρακτηριστικά	62
4.2.2 Κανόνες ασφαλείας κατά τη χρήση του laser	63
4.2.3 Οπτική λειτουργία	66
4.2.4 Ηλεκτρονική λειτουργία	66
4.2.5 Τα μέρη του laser	67

4.2.6 Τρόποι λειτουργίας	71
4.4 Εξωτερική λειτουργία - Παρουσίαση λογισμικού ελέγχου USB	71
4.3 Υλοποίηση	76
4.3.1 Ρυθμός επανάληψης	76
4.3.2 Συνδέσεις SUB-D25.....	81
4.4 Χειρισμός του laser και επίλυση προβλημάτων	88
Κεφάλαιο 5: Συνολική υλοποίηση	96
5.1 Διάταξη ελέγχου	96
5.2 Συνολικός κώδικας Arduino	96
5.3 Λειτουργία και δοκιμές	100
5.4 Εκτέλεση προγραμμάτων G-κώδικα	101
5.5 Κίνηση X,Y,Z αξόνων και μηχανισμού εναπόθεσης σκόνης.....	102
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία.....	107
Βιβλιογραφία.....	108

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Ταχεία κατασκευή (Rapid manufacturing) [28]

Η ταχεία κατασκευή είναι ένας ευρύς όρος, ο οποίος συμπεριλαμβάνει την ταχεία προτυποποίηση, την ταχεία κατεργασία και την άμεση χρήση των τεχνολογιών κατασκευής σε επίπεδα, για τη γρήγορη παραγωγή τελικών προϊόντων.

Η ταχεία κατασκευή είναι ένας νέος τομέας στην κατασκευή ο οποίος αναπτύχθηκε από μια οικογένεια τεχνολογιών γνωστή ως ταχεία προτυποποίηση. Αυτές οι διαδικασίες είχαν ήδη ως αποτέλεσμα τόσο τη βελτίωση των προϊόντων όσο και τη μείωση του χρόνου ανάπτυξης τους. Αυτό με τη σειρά του οδήγησε στην ανάπτυξη της τεχνολογίας ταχείας κατεργασίας, η οποία εφάρμοσε τεχνικές ταχείας προτυποποίησης έτσι ώστε να βελτιώσει τις δικές της διαδικασίες. Η ταχεία κατασκευή αναπτύχθηκε ως το επόμενο στάδιο, στο οποίο εξαλείφεται η ανάγκη για εργαλεία. Έχει αποδειχθεί ότι είναι οικονομικά εφικτό να γίνει χρήση υπαρχόντων εμπορικών συστημάτων ταχείας προτυποποίησης για την κατασκευή σειρών τμημάτων σε ποσότητες έως και 20.000 και εξατομικευμένων τμημάτων σε ποσότητες εκατοντάδων χιλιάδων. Αυτή η μορφή κατασκευής μπορεί να είναι οικονομικά αποδοτική, ενώ η διαδικασία είναι πολύ πιο ευέλικτη από αυτή της συμβατικής κατασκευής.

1.1.1 Διαδικασία της ταχείας κατασκευής [25]

Αν και υπάρχουν πολλές διαφορετικές τεχνικές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την Ταχεία Κατασκευή ενός κομματιού, τα βήματα από το αρχικό CAD αρχείο μέχρι την κατασκευή του τελικού τεμαχίου, είναι στις περισσότερες των περιπτώσεων κοινά. Τα βήματα αυτά περιγράφονται παρακάτω:

Βήμα 1^ο: Δημιουργία αρχείου CAD

Όλες οι διαδικασίες Ταχείας Κατασκευής ξεκινούν από την δημιουργία ενός ψηφιακού μοντέλου (CAD file) που περιγράφει πλήρως την γεωμετρία του προς κατασκευή τεμαχίου.

Βήμα 2^ο: Μετατροπή σε αρχείο STL

Σχεδόν όλες οι εμπορικές μηχανές Ταχείας Κατασκευής δέχονται σαν είσοδο αρχεία STL. Αυτός ο τύπος αρχείων περιγράφει τις επιφάνειες που περιβάλλουν το αρχικό αρχείο CAD και χρησιμοποιείται σαν είσοδος στα επόμενα βήματα. Σε ερευνητικό επίπεδο βρίσκεται η δημιουργία αρχείων εισόδου που επιτρέπουν και τον ορισμό της εσωτερικής σύστασης του τεμαχίου.

Βήμα 3^ο: Μεταφορά αρχείου STL στην μηχανή και επεξεργασία του

Το αρχείο STL μεταφέρεται στην μηχανή. Εδώ μπορεί να χρειάζεται να γίνουν μερικές τροποποιήσεις, όπως ο ορισμός του σωστού μεγέθους ή του σημείου κατασκευής στην μηχανή.

Βήμα 4^ο: Προετοιμασία της μηχανής

Η μηχανή θα πρέπει να είναι σωστά ρυθμισμένη για να διεξαχθεί επιτυχώς η διαδικασία της κατασκευής. Σε αυτό το στάδιο ορίζονται οι παράμετροι της κατεργασίας, όπως το υλικό, η πηγή ενέργειας, το πάχος κάθε στρώματος, ο χρονισμός κ.τ.λ. Σε αυτό το στάδιο γίνεται συνήθως και η «κοπή» του αρχείου STL σε στρώματα (slicing) και η δημιουργία του G-κώδικα για τον έλεγχο της μηχανής.

Βήμα 5^ο: Κατασκευή του τεμαχίου

Η κατασκευή του τεμαχίου είναι κατά βάση μία αυτοματοποιημένη διαδικασία και μόνο εποπτικός έλεγχος χρειάζεται από τον χειριστή.

Βήμα 6^ο: Αφαίρεση του τεμαχίου

Μετά το τέλος την κατασκευής γίνεται η αφαίρεση του τεμαχίου από την μηχανή. Αυτό το στάδιο χρειάζεται προσοχή, γιατί το τεμάχιο ενδέχεται να είναι ιδιαίτερα εύθραυστο ή να υπάρχουν κάποιες επιπρόσθετες κατασκευές για την στήριξη του.

Βήμα 7^ο: Κατεργασίες αποπεράτωσης του τεμαχίου

Μετά την αφαίρεσή του από την μηχανή, το τεμάχιο χρειάζεται να καθαριστεί ή να υποβληθεί σε κάποιες διαδικασίες αποπεράτωσης, όπως επιφανειακή βαφή, αμβροβολή ή διάχυση.

Βήμα 8^ο: Τελική χρήση

Το τεμάχιο είναι έτοιμο για τελική χρήση.

1.2 Προσθετική κατασκευή (Additive manufacturing) [28]

Η έλευση της τεχνολογίας Προσθετικής Κατασκευής (AM), που αναφέρεται επίσης ως 3D εκτύπωση (3DP), έχει οδηγήσει σε αύξηση της χρήσης του στη βιομηχανία και επιστημονικά εργαστήρια, καθώς και στα σπίτια. Στις διαδικασίες AM, οι κατασκευές δημιουργούνται σε επίπεδα (layer by layer) καθώς ένα επιλεγμένο υλικό διαμορφώνεται με ακρίβεια μέσω οδηγιών από υπολογιστή σε δισδιάστατη γεωμετρία. Κάθε διαμορφωμένο επίπεδο χτίζεται πάνω στο προηγούμενο στρώμα για να αποδώσει μια 3D δομή. Αυτή η προσέγγιση για κατασκευή έχει υιοθετηθεί για την ταχεία προτυποποίηση μηχανικών μερών, κατασκευή μικρών παρτίδων εξειδικευμένων προϊόντων και την κατασκευή δομών, οι οποίες θα ήταν δύσκολο ή αδύνατο να κατασκευαστούν με διαφορετικό τρόπο. Για παράδειγμα, η AM επέτρεψε την κατασκευή ειδικών ιατρικών εμφυτευμάτων με διαβαθμίσεις στην εσωτερική γεωμετρία, που ειδάλλως θα ήταν δύσκολο και απαγορευτικά ακριβό να παραχθούν. Δύο διαδεδομένες τεχνολογίες AM είναι η εξώθηση 3DP, στην οποία τα υλικά αποτίθενται σε διαδοχικά στρώματα, καθώς εξωθούνται μέσα από ένα μικρό (~ 0,1-1mm) άνοιγμα και η στερεολιθογραφία, η οποία χρησιμοποιεί ένα λέιζερ ή άλλη πηγή φωτός για να μετατρέψει επιλεκτικά ένα υγρό αρχικό υλικό σε στερεό.

1.3 SLS - Γενικά [21]

Η Επιλεκτική Πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ ή Selective Laser Sintering (SLS) είναι μια τρίτη και ιδιαίτερα ευπροσάρμοστη διαδικασία AM που δημιουργεί στερεά τεμάχια μέσω μίας δέσμης λέιζερ, εστιασμένης σε ένα λεπτό στρώμα σκόνης. Η σκόνη θερμαίνεται και τήκεται σε ένα στερεό πρότυπο καθώς απορροφά την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπεται από το λέιζερ. Οι 3D δομές κατασκευάζονται με επανάληψη αυτής της διαδικασίας κατά στρώσεις (layer by layer) καθώς νέα στρώματα σκόνης διατάσσονται πάνω στα προηγούμενα λιωμένα στρώματα. Ένα βασικό πλεονέκτημα της SLS είναι η δυνατότητα να κατασκευάσουμε προεξέχουσες περιοχές ή/και κοιλότητες οι οποίες είναι είτε απρόσιτες με τη χρήση άλλων διαδικασιών ή δυνατό να επιτευχθούν μόνο με τα κατάλληλα υλικά υποστήριξης. Στην SLS, η σκόνη που δεν έχει λιώσει και που βρίσκεται εκτός της λιωμένης επιφάνειας, παραμένει εντός του όγκου κατασκευής και ενεργεί ως υλικό στήριξης για τα επόμενα στρώματα, επιτρέποντας τον σχηματισμό προεκτάσεων και διακλαδώσεων. Η χρήση ενός εστιασμένου laser ως εργαλείου μορφοποίησης, δίνει στην SLS τη δυνατότητα για υψηλά (υπο-χιλιοστού) χαρακτηριστικά ανάλυσης και η υψηλή ενέργεια του λέιζερ επιτρέπει κατασκευές

χρησιμοποιώντας όχι μόνο πολυμερή, αλλά επίσης κεραμικά και μέταλλα. Επίσης, πρόσφατα, η SLS έχει επεκταθεί και σε βιοϋλικά.

Κάποιες μηχανές που έχουν κατασκευαστεί σε ερευνητικό επίπεδο παρουσιάζονται παρακάτω:

Open Source μηχανή επιλεκτικής πυροσυσσωμάτωσης με λέιζερ με χρήση Νάυλον και Βιοσυμβατής Πολυκαπρολακτόνης:

Η κατασκευή αυτή έγινε στο τμήμα Βιομηχανικής, στο Rice University, ΗΠΑ. [21]

Αφορά στην ανάπτυξη ενός χαμηλού κόστους, συστήματος SLS open-source (OpenSSL) που έχει την ικανότητα να κατασκευάσει δομές από νάυλον με χαρακτηριστικά υπο-χιλιοστού και προεξέχουσες περιοχές. Υποστηρίζει επίσης κατασκευή από πολυκαπρολακτόνη (PCL) σε μακροπορώδεις δομές όπως ένα πλέγμα διαμαντιού.

Το εκτεταμένο ενδιαφέρον για τη χρήση PCL στη μηχανική ιστών των οστών απαιτεί τα PCL πλέγματα να έχουν σχετικές γεωμετρίες με τα μοντέλα ικριωμάτων για τη μηχανική οστών. Υλικά με μεγάλο μέγεθος κόκκου σκόνης (~ 500μm) οδηγούν σε μέρος επιφανειών με υψηλή τραχύτητα. Έτσι, στην εργασία αυτή έγινε χρήση μιας απλής τεχνικής εξομάλυνσης με ατμό για να μειωθεί η επιφανειακή τραχύτητα των PCL δομών, το οποίο βελτιώνει περαιτέρω το μέτρο ελαστικότητας και την τάση διαρροής. Τέλος, αποδεικνύεται ότι τα ανθρώπινα μεσεγχυματικά βλαστικά κύτταρα είναι σε θέση να προσκολληθούν, να επιβιώσουν και να διαφοροποιηθούν σε πορώδεις και εξομαλυσμένες επιφάνειες PCL, γεγονός που υποδηλώνει ότι το OpenSLS έχει τη δυνατότητα να παράγει ικριώματα PCL χρήσιμα για τις μελέτες των κυττάρων. Το OpenSLS παρέχει στην επιστημονική κοινότητα μια προσβάσιμη πλατφόρμα για τη μελέτη της πυροσυσσωμάτωσης λέιζερ και την κατασκευή πολύπλοκων γεωμετριών σε ποικίλα υλικά.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το υλικό (hardware) της custom OpenSLS μηχανής:



Εικόνα 1.1: Το υλικό της OpenSLS

Χρησιμοποιήθηκε ένα laser κοπής CO₂ με 60 × 90 cm πλατφόρμα κατεργασίας ως βάση για το σύστημα OpenSLS λόγω του μεγάλου εύρους ισχύος και μεγάλου εύρους δυνατοτήτων.

Επίσης επιλέχθηκε ένα board RepRap Arduino Mega και μια ολοκληρωμένη μητρική 3D εκτυπωτή, για τον έλεγχο της OpenSLS λόγω των 5 αξόνων των βηματικών κινητήρων του, των pins εξόδου διαμόρφωσης πλάτους παλμού (PWM) καθώς και της συμβατότητας με το ευρέως χρησιμοποιούμενο opensource Marlin λογισμικό. Το laser που χρησιμοποιήθηκε είναι ισχύος 40W και παρέχεται υψηλότερη ανάλυση ισχύος σε χαμηλότερη ρύθμιση ισχύος.

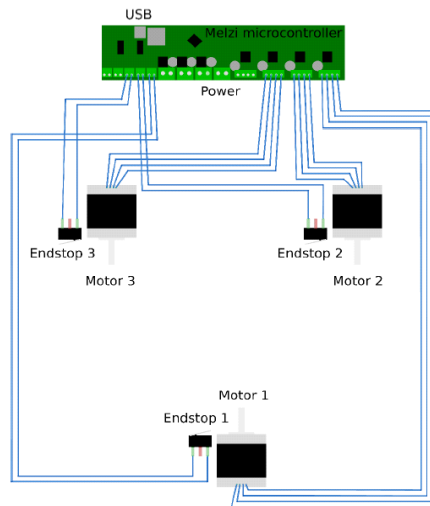
Τέλος, κατασκευαστικά, η SLS απαιτεί ένα λέιζερ για τη μορφοποίηση επιθυμητών γεωμετριών σε υλικά σκόνης, μια πλατφόρμα κατασκευής στην οποία γίνεται η μορφοποίηση αυτή, μια δεξαμενή για να αποθηκεύει το κονιοποιημένο υπόστρωμα και ένας διανομέας για τη μεταφορά σκόνης από την δεξαμενή προς την πλατφόρμα κατασκευής. Επιπλέον, ενώ τα συμβατικά συστήματα χρησιμοποιούν οπτικά μέσα για την οδήγηση της δέσμης λέιζερ κατά μήκος της πλατφόρμας, το λέιζερ στην OpenSSL ταξιδεύει κατά μήκος της διαδρομής εργαλείου που αντιστοιχεί στην γεωμετρία που πυροσυσσωματώνεται.

Open Source 3D εκτυπωτής μετάλλου χαμηλού κόστους:

Η κατασκευή αυτή έγινε στο Michigan Technological University. [23]

Ο εκτυπωτής μετάλλου αποτελείται από δύο μονάδες, ένα στάδιο τριών αξόνων το οποίο ελέγχεται με το μικροελεγκτή ανοιχτού κώδικα και μια χαμηλού κόστους κεφαλή συγκόλλησης τόξου αερίου μετάλλου (GMAW). Τα δύο αυτά μέρη λειτουργούν ανεξάρτητα μεταξύ τους, και για μια ολοκληρωμένη λειτουργία με βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων θα πρέπει να συνδυαστεί ο έλεγχος των

κινητήρων με τη διάταξη προώθησης και τήξης του σύρματος συγκόλλησης. Το ηλεκτρικό σχέδιο του εκτυπωτή καθώς και ένα εκτυπωμένο αντικείμενο φαίνονται στις παρακάτω εικόνες:



Εικόνα 1.2: Ηλεκτρικό σχέδιο του εκτυπωτή



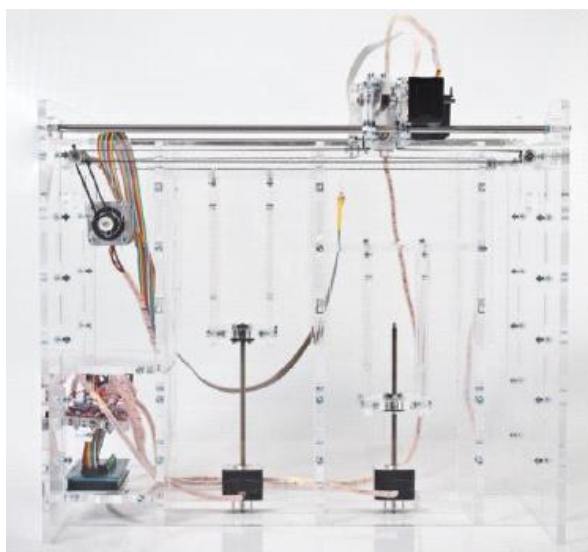
Εικόνα 1.3: Εκτυπωμένο αντικείμενο

Open source σκόνη μηχανή ταχείας προτυποποίησης βασισμένη σε σκόνη κεραμικών υλικών:

Η κατασκευή αυτή έγινε στο University of Twente. [22]

Ο κύριος λόγος για τη διερεύνηση της εκτύπωσης άμεσου ψεκασμού κεραμικών μεμβρανών είναι ότι το σχήμα του τελικού προϊόντος μπορεί να βελτιστοποιηθεί και δεν περιορίζεται από τους περιορισμούς που τίθενται από τις κλασικές τεχνικές κατασκευής μεμβρανών. Άλλο πλεονέκτημα της χρησιμοποίησης διαδικασιών εκτύπωσης με ψεκασμό είναι ότι κεραμικές μεμβράνες μπορούν να κατασκευαστούν χωρίς δαπανηρό μηχανικό φινίρισμα. Δεν υπάρχει ανάγκη για τη χρήση εξειδικευμένων εργαλείων και το χρονικό διάστημα μεταξύ του σχεδιασμού και της παρασκευή αυτών ελαχιστοποιείται. Η επιθυμητή περιοχή επιφάνειας των μεμβρανών κυμαίνεται από 30 έως 100m²/g, ενώ το πορώδες είναι 30 έως 40%.

Η μηχανή αποτελείται από δύο κάδους που περιέχουν τη σκόνη. Για την τοποθέτηση ενός νέου στρώματος σκόνης στην κορυφή του εμβόλου του δοχείου αποθήκευσης σκόνης, το έμβολο ανυψώνεται ενώ το έμβολο κατασκευής κατεβαίνει. Η σκόνη από το δοχείο αποθήκευσης μετακινείται στη συνέχεια από ένα αντίθετης περιστροφής κύλινδρο, από το δοχείο αποθήκευσης στο δοχείο κατασκευής. Όταν ένα νέο στρώμα σκόνης εναποτίθεται, τα σωματίδια είναι τοπικά συνδεδεμένα. Μια κεφαλή εκτυπωτή είναι συνδεδεμένη σε μια κατασκευή δύο αξόνων. Τα εργαλεία είναι σπονδυλωτά, δηλαδή ένα λέιζερ μπορεί να τοποθετηθεί για την προσαρμογή των μηχανών για τη διαδικασία επιλεκτικής πυροσυσσωμάτωσης με laser (SLS).



Εικόνα 1.4: Προφίλ της μηχανής

Στην παραπάνω εικόνα φαίνονται τα ηλεκτρονικά κάτω αριστερά, ο βηματικός – Υ πάνω αριστερά και η διάταξη των οδηγών για την κίνηση της κεφαλής στο ΧΥ επίπεδο πάνω δεξιά.

Παρακάτω περιγράφονται τα βασικά επιμέρους χαρακτηριστικά της μηχανής:

- Ηλεκτρονικά: Η κύρια μονάδα είναι ένας μικροελεγκτής Arduino Mega 2560, ενώ σε αυτόν συνδέονται: Η μονάδα ελέγχου της κεφαλής, τρεις drivers EasyDriver για τους βηματικούς που αφορούν στην κίνηση ΧΥ καθώς και του κυλίνδρου, καθώς και δύο Big EasyDriver drivers για τους δύο οδηγούς γραμμικής κίνησης.
- Θέση: Οι αλλαγές θέσεων επιτυγχάνονται με τη βοήθεια βηματικών κινητήρων, άρα σε ανοιχτό βρόχο. Η κίνηση των εμβόλων γίνεται μέσω οδηγών γραμμικής κίνησης. Η κίνηση για κάθε step (για λειτουργία 16 step με microstepping) είναι 0.625μm.
- Χειρισμός της σκόνης: Το υλικό σε σκόνη εναποτίθεται με τη μεταφορά του από το δοχείο αποθήκευσης στο δοχείο κατασκευής από ένα κύλινδρο αντίθετης περιστροφής ο οποίος κύλινδρος κινείται από ένα stepper κινητήρα μέσω ενός ιμάντα χρονισμού. Η διαδικασία εναπόθεσης ενός νέου στρώματος σκόνης διαρκεί ±30 δευτερόλεπτα. Η πυκνότητα της σκόνης στον κάδο κατασκευής ρυθμίζεται μεταβάλλοντας το νέο ύψος του στρώματος. Ο κύλινδρος μπορεί επίσης να εναποθέσει τη σκόνη με μια προς τα εμπρός περιστροφή ή με τρόπο διπλής δράσης. Άλλοι τρόποι για να ρυθμιστεί η πυκνότητα του όγκου είναι να μεταβληθεί η διάμετρος του κυλίνδρου και η τριβή.
- Λογισμικό: Το τμήμα λογισμικού μπορεί να χωριστεί σε δύο μέρη: Το firmware που ελέγχει τους επενεργητές της μηχανής και χειρίζεται τη διαδικασία εκτύπωσης που τρέχει στο μικροελεγκτή Arduino και το λογισμικό για την παρακολούθηση της διαδικασίας, που τρέχει στον υπολογιστή του χρήστη. Οι εργασίες που εκτελούνται από το λογισμικό περιλαμβάνουν: Έλεγχος των βηματικών, αποστολή παλμών για την κεφαλή εκτύπωσης, επικοινωνία με τον υπολογιστή μέσω σειριακής γραμμής και την ανάγνωση και επεξεργασία των αρχείων εκτύπωσης από μια κάρτα SD κατά τη διάρκεια μιας εργασίας εκτύπωσης.

Αποτελέσματα εκτύπωσης: Έως τώρα έχουν χρησιμοποιηθεί τρία υλικά στο μηχάνημα: Γύψος (ZCorp ZP131), αλουμίνια (AKP-15) και ζirkονία (TZ-2Y), τα οποία χρησιμοποιούνται για την παραγωγή κεραμικών μεμβρανών. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το αποτέλεσμα της κατεργασίας αλουμίνιας και αλουμίνιας-ζirkονίας.



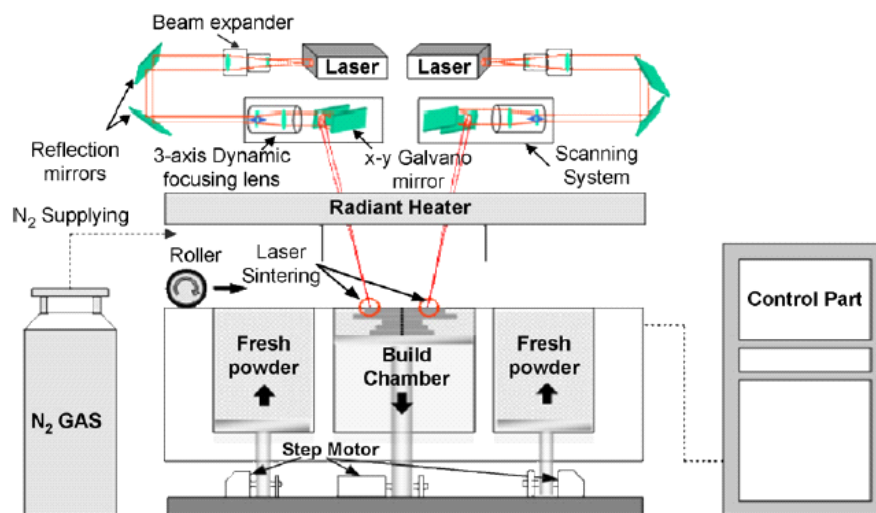
Εικόνα 1.5: Αριστερά: Πυροσυσσωματωμένο τμήμα αλουμίνας, Δεξιά: Πυροσυσσωματωμένο τμήμα αλουμίνας-ζirkονίας.

Ανάπτυξη βιομηχανικού συστήματος SFF (solid freeform fabrication, κατασκευή στερεού ακανόνιστου σχήματος) με χρήση διπλού λέιζερ [29]

Ο σκοπός της έρευνας αυτής είναι η ανάπτυξη πιο περίτεχνων και γρήγορων συστημάτων για την κατασκευή μεγάλων αντικειμένων σε σχέση με τις υπάρχουσες SLS, χρησιμοποιώντας μια νέα επιλεκτική συσσωμάτωσης διπλού laser (SLS) διαδικασία. Επίσης, περιλαμβάνει σύστημα σαρωτή δυναμικής εστίασης τριών αξόνων για τη σάρωση μεγάλης περιοχής, αντί των fθ φακών που χρησιμοποιούνται σε εμπορικές SLS. Έτσι, έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να αποτρέψει τη δημιουργία σημειακών παραμορφώσεων που παρατηρούνται όταν ακτινοβολείται laser σε μεγάλη περιοχή, μέσω της μεταβλητής εστιακής του απόστασης.

Πιο συγκεκριμένα, η εργασία αφορά στην ανάπτυξη ενός τρισδιάστατου ψηφιακού συστήματος επικάλυψης πραγματικών αντικειμένων (3D ράβδοι) με πολλαπλές λειτουργίες, όπως η 3D σάρωση και το σύστημα SFF. Το σύστημα 3D σάρωσης κατασκευάστηκε χρησιμοποιώντας ρομπότ, έτσι ώστε ένας οπτικός σαρωτής και ένα σύστημα πολλαπλών αξόνων να χρησιμοποιούνται για την αποτελεσματική σάρωση αντικειμένων. Το σύστημα SFF αναπτύχθηκε επίσης με την εφαρμογή διπλού λέιζερ και σύστημα σαρωτή τριών αξόνων δυναμικής εστίασης για την ενεργοποίηση μεγάλης περιοχής επικάλυψη πραγματικού αντικειμένου.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η διάταξη του βιομηχανικού SFF συστήματος, η οποία αποτελείται από τη μονάδα παροχής και μεταφοράς της σκόνης, τη μονάδα προθέρμανσης, τη μονάδα παροχής αζώτου για την αποφυγή μικροεκρήξεων κατά τη διαδικασία τήξης της σκόνης και την προστασία του φακού σάρωσης.



Εικόνα 1.6: Σχηματικό διάγραμμα του βιομηχανικού SFF συστήματος

Τα πλεονεκτήματα της διαδικασίας SFF είναι ότι δημιουργεί 3D αντικείμενα σε στρώσεις κάνοντας χρήση κονιοποιημένων υλικών με θερμότητα που παράγεται από ένα laser CO₂. Σε σύγκριση με την υπάρχουσα διαδικασία αφαίρεσης υλικού, η SFF έχει την ικανότητα της ταχείας παραγωγής πρωτοτύπων, της διαμόρφωσης πολύπλοκων εσωτερικών σχημάτων, και την κατασκευή πολλαπλών προϊόντων. Αντίθετα, μία από τις αδυναμίες του SFF είναι ότι η ποιότητα της επιφάνειας των πρωτοτύπων και ο χρόνος επεξεργασίας είναι επηρεάζεται σημαντικά από τη διαμόρφωση της κατασκευής. Επίσης, αρκετές κατασκευαστικές παράμετροι όπως η ισχύς του λέιζερ, η θερμοκρασία της θέρμανσης και ο ρυθμός τροφοδοσίας της σκόνης θα πρέπει να είναι επιλέγονται προσεκτικά. Είναι ωστόσο σημαντικό ότι, απαιτείται περισσότερος χρόνος για την προετοιμασία της κατασκευής όπως η προμήθεια της σκόνης και η κίνηση της πλατφόρμας από τη διαδικασία της πυροσυσσωμάτωσης. Ως εκ τούτου, ο προσδιορισμός των παραμέτρων κατασκευής θεωρείται ως η πιο σημαντική προϋπόθεση της διαδικασίας.

Απευθείας κατασκευή μετάλλων με laser: Ανάπτυξη μηχανήματος και πειραματική εργασία [30]

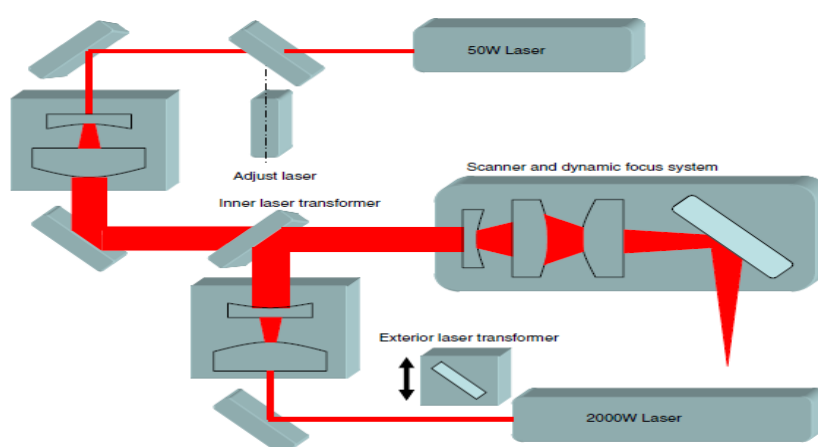
Η εργασία αφορά στην ανάπτυξη μιας πειραματικής πλατφόρμας για την έρευνα της απευθείας κατασκευής μεταλλικών αντικειμένων με laser (Direct Metal Laser Fabrication/DMLF). Ο σκοπός είναι, η διάταξη να μπορεί να πυροσυσσωματώσει μεταλλική σκόνη κάνοντας χρήση laser υψηλής ισχύος αλλά και μη μεταλλική σκόνη, όπως πλαστικό, πολυαμίδια, και άμμο με τη χρήση laser χαμηλής ισχύος.

Για την υλοποίηση χρησιμοποιήθηκε μια SLS μηχανή με laser υψηλής ισχύος καθώς και μια SLS με laser χαμηλής ισχύος. Σημειώνεται ότι τα laser έπρεπε να έχουν τα

ίδια χαρακτηριστικά όσον αφορά το μήκος κύματος και τον τύπο τους. Έτσι, το laser CO₂ με ισχύ 2000W, εγκαταστάθηκε σε μια μηχανή SLS η οποία έκανε χρήση laser CO₂ με ισχύ 50W. Προϋπόθεση για την εγκατάσταση αυτή αποτελούν οι αλλαγές στις θέσεις των κατόπτρων κατεύθυνσης της δέσμης, των μηχανολογικών, ηλεκτρολογικών και λοιπών συστημάτων ελέγχου, με αποτέλεσμα μια μηχανή με μέγιστη ισχύ 1kW.

Τέλος, προστέθηκε ένας εσωτερικός μετασχηματιστής που επιτρέπει είτε την ενεργοποίηση της δέσμης laser χαμηλής ισχύος για τήξη μη μεταλλικής σκόνης, είτε της δέσμης υψηλής ισχύος, για μεταλλική πρώτη ύλη.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η επανασχεδιασμένη διαδρομή της δέσμης laser από τις δύο πηγές:



Εικόνα 1.7 : Επανασχεδιασμένη διαδρομή της δέσμης laser από τις δύο πηγές

Σχεδιασμός, ανάπτυξη και ανάλυση FDM φορητής μηχανής ταχείας προτυποποίησης [31]

Η διάταξη αφορά στην κατασκευή ενός τρισδιάστατου εκτυπωτή FDM. Για την κατασκευή της μηχανής αυτής χρησιμοποιήθηκαν βηματικά μοτέρ για τον έλεγχο κάθε άξονα, ενώ ιμάντες χρονισμού χρησιμοποιήθηκαν για τους X και Y άξονες, δεδομένου ότι προσφέρουν μεγαλύτερη ταχύτητα. Για τον άξονα Z χρησιμοποιήθηκαν ράβδοι με σπείρωμα, δεδομένου ότι απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια και υψηλότερη ροπή. Για τους X και Y άξονες τα άκρα του ιμάντα χρονισμού συνδέονται με το κινητό μέρος, έτσι ώστε να κινείται κατά μήκος του ιμάντα όταν αυτός κινείται από το βηματικό κινητήρα. GT2 ιμάντες

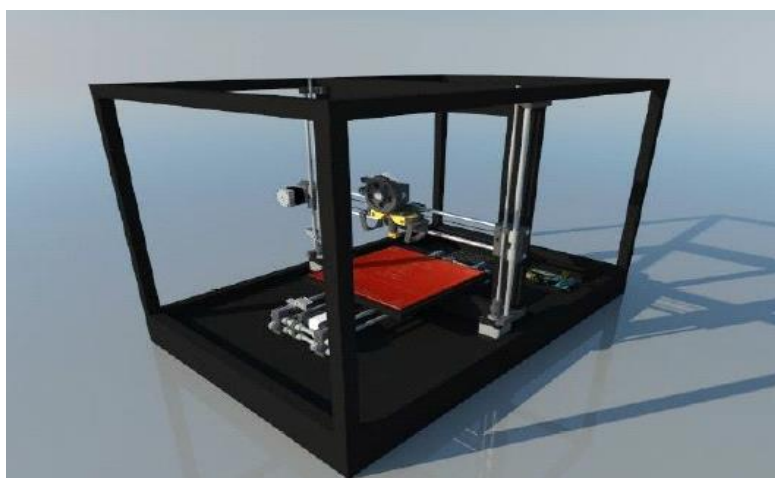
χρησιμοποιήθηκαν ως ιμάντες χρονισμού, δεδομένου ότι έχουν προφίλ οδόντων που λειτουργεί καλύτερα με τα συστήματα γραμμικής θέσης.

Έγινε χρήση 5 βηματικών κινητήρων, δύο εκ των οποίων χρησιμοποιούνται για τις δύο ράβδους του Z άξονα και ένας βηματικός για κάθε έναν από άλλους άξονες. Οι κινητήρες αυτοί ελέγχονται με τον driver A4988 και τα απαιτούμενα σήματα που απαιτούνται για τους stepper που αποστέλλονται από ένα μικροελεγκτή Arduino MEGA. Το Arduino παίρνει τις αναγκαίες οδηγίες για τον έλεγχο των driver μέσω σειριακής θύρας που είναι συνδεδεμένη με έναν υπολογιστή. Ένα λογισμικό σειριακής μετάδοσης δεδομένων εκτελείται στον υπολογιστή κάνοντας χρήση λογισμικό σε επίπεδα για να “κόψει” το μοντέλο σε στρώματα και να μετατρέψει αυτά τα διανυσματικά δεδομένα σε G-κώδικα.

Επίσης, υπάρχουν διάφοροι αισθητήρες για τον έλεγχο των κινήσεων των αξόνων, όπως μηχανικοί διακόπτες, ενώ για τον έλεγχο της θερμοκρασίας της κεφαλής (extruder) χρησιμοποιούνται αναλογικά θερμίστορ. Τέλος, το σύνολο του συστήματος λειτουργεί με 12V και απαιτεί έως και 20A ρεύμα.

Κατά τη διαδικασία των δοκιμών εκτύπωσης παρατηρήθηκαν κάποια προβλήματα, όπως η παραμόρφωση του παραγόμενου αντικειμένου εξαιτίας της απόστασης του Z άξονα από την επιφάνεια εκτύπωσης, το οποίο βελτιώθηκε μειώνοντας αυτή την απόσταση, ενώ στη συνέχεια, το πρόβλημα αποκόλλησης των πρώτων στρώσεων του αποτιθέμενου υλικού από την επιφάνεια κατασκευής λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας, προτείνεται να αντιμετωπιστεί με τη χρήση ταινίας διπλής όψης, για τη συγκράτηση του αντικειμένου.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται μια τρισδιάστατη όψη του μοντέλου:



Εικόνα 1.8: 3D όψη του μοντέλου

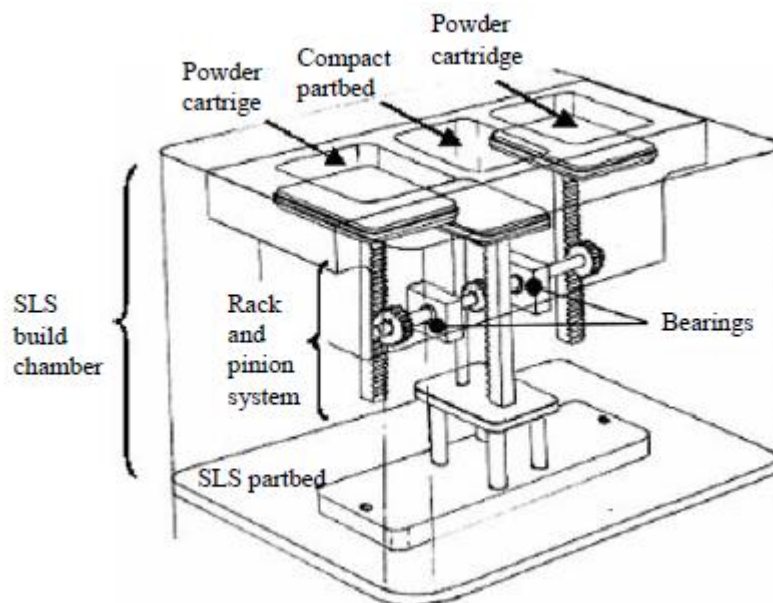
Εργαλεία προσαρμογής επιλεκτικής πυροσυσσωμάτωσης με laser για την οικονομικά αποδοτική κατασκευή βιοϊατρικών πρωτοτύπων [32]

Τα τελευταία χρόνια, η επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ (SLS) χρησιμοποιείται στον τομέα της βιοϊατρικής, συμπεριλαμβανομένης της κατασκευής μικρής κλίμακας βιοϊατρικών συσκευών όπως ικριώματα της μηχανικής ιστών και συσκευές χορήγησης φαρμάκου. Η συγκεκριμένη εργασία περιγράφει ένα συμπαγές σύστημα προσαρμογής για την απόκτηση ενός πιο αποτελεσματικού και αποδοτικού τρόπου πυροσυσσωμάτωσης πρωτοτύπων μικρής κλίμακας με στόχο να μειωθεί η σπατάλη της σκόνης. Το σύστημα αυτό ενσωματώνεται στην ήδη υπάρχουσα μηχανή SLS (Sinterstation 2500) χωρίς να απαιτείται καμία επιπλέον παροχή ενέργειας.

Η συσκευή προσαρμογής που κατασκευάστηκε κινείται μέσω της πλατφόρμας κατασκευής της υπάρχουσας μηχανής χωρίς πρόσθετα συστήματα ελέγχου. Έτσι, η συσκευή είναι ένα ολοκληρωμένο προσάρτημα που στερεώνεται πάνω στην πλατφόρμα κατασκευής της SLS. Το σύστημα μετάδοσης της συσκευής είναι φτιαγμένο ώστε να κινείται με την κίνηση της υπάρχουσας πλατφόρμας κατασκευής με τρόπο τέτοιο ώστε όταν ανυψώνονται τα δοχεία αποθήκευσης σκόνης, η νέα πλατφόρμα κατασκευής να χαμηλώνει αντίστοιχα, για να στρωθεί ένα νέο επίπεδο σκόνης. Για να αυξηθεί περαιτέρω η εξοικονόμηση ενέργειας, ένα βελτιωμένο σύστημα παροχής σκόνης που ονομάζεται εναλλακτικός μηχανισμός τροφοδοσίας (ASM) είναι τοποθετημένος στην κορυφή του κυλίνδρου έτσι ώστε να συνδεθεί με τη συσκευή προσαρμογής.

Συνοψίζοντας, η εργασία δείχνει την ανάπτυξη και τη βιωσιμότητα των συσκευών προσαρμογής για την SLS με σκοπό τη σημαντική μείωση της κατανάλωσης ενέργειας με τη χρήση αποκλειστικά μηχανικών μέσων για την κατασκευή μικρών εξαρτημάτων, χωρίς τη χρήση εξωτερικού τροφοδοτικού. Το πόρισμα είναι ότι με τη χρήση της συσκευής προσαρμογής εξοικονομείται σκόνη έως και 6,5 φορές σε σύγκριση με τη χρήση της πλήρους έκδοσης του Sinterstation 2500. Επιπλέον, η σπατάλη σκόνης μειώνεται κατά 84 τοις εκατό κατά τη χρήση του εναλλακτικού μηχανισμού τροφοδοσίας (ASM).

Στο παρακάτω σχήμα, φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα της συσκευής προσαρμογής:



Εικόνα 1.9 : Σχηματικό διάγραμμα συσκευής προσαρμογής

1.4 Σκοπός εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία εντάσσεται στο ευρύτερο αντικείμενο της κατασκευή μιας μηχανής επιλεκτικής τήξης/πυροσυσσωμάτωσης με laser (SLS/SLM). Πρόκειται για υλοποίηση των σχεδίων που αρχικά παρουσιάστηκαν και ως ένα βαθμό κατασκευάστηκαν από το Νικόλαο Κοντολάτη [24], που αφορούν στο μέρος της μηχανής που περιλαμβάνει τους άξονες κίνησης της κεφαλής laser, και των σχεδίων για το μηχανισμό εναπόθεσης σκόνης που παρουσιάζεται στη διπλωματική του Αλκαίου Μπουρνιά [25]. Η κατασκευή των μηχανολογικών εξαρτημάτων πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τα συγκεκριμένα σχέδια, ενώ η υλοποίηση του αυτομάτου ελέγχου βασίστηκε στη διπλωματική εργασία του Ανδρέα Μιχελή [26].

Παρουσιάζονται α) οι βηματικοί κινητήρες της μηχανής, β) η σχεδίαση και η υλοποίηση του συστήματος οδήγησης των κινητήρων αυτών, γ) τα παλμικά laser και συγκεκριμένα το laser YLIA M20 και δ) η υλοποίηση των απαιτούμενων συνδέσεων για την ορθή λειτουργία του laser.

Η κατασκευή της μηχανής πραγματοποιήθηκε σε συνεργασία με το Φωτεινό Ρογάρη [27], στη διπλωματική του οποίου παρουσιάζεται η διαδικασία κατασκευής και συναρμολόγησης των μηχανολογικών εξαρτημάτων και επί μέρους τμημάτων

της μηχανής, καθώς και μέρος των τμημάτων που σχετίζονται με τα συστήματα κίνησης και ελέγχου.

1.5 Δομή εργασίας

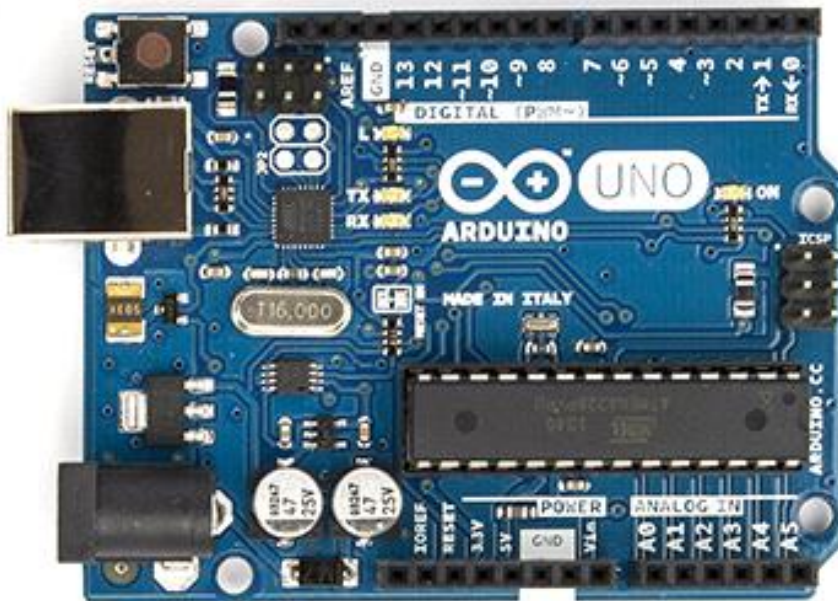
Το κείμενο της εργασίας αποτελείται από 6 κεφάλαια. Το πρώτο αποτελεί την εισαγωγή και το τελευταίο ανακεφαλαιώνει με συμπεράσματα και μελλοντικές επεκτάσεις, ενώ τα ενδιάμεσα τέσσερα κεφάλαια πραγματεύονται το κυρίως θέμα της διπλωματικής και αποτελούν τη σχεδίαση και την υλοποίηση επιμέρους στοιχείων της μηχανής ως εξής:

- 1. Μικροελεγκτής Arduino: Γενικά χαρακτηριστικά.**
- 2. Βηματικοί κινητήρες: Αρχή λειτουργίας, χαρακτηριστικά, σχεδιασμός, προγραμματισμός και υλοποίηση κυκλωμάτων οδήγησης με τη χρήση του Arduino.**
- 3. Laser: Αρχή λειτουργίας παλμικών laser, παρουσίαση του YLIA M20, υλοποίηση συνδέσεων, παρουσίαση λογισμικού εποπτείας.**
- 4. Συνολική υλοποίηση και δοκιμή ελέγχου**

Κεφάλαιο 2: Ο μικροελεγκτής Arduino

2.1 Εισαγωγή [1]

Το Arduino είναι ένας single-board μικροελεγκτής, δηλαδή μια απλή μητρική πλακέτα ανοικτού κώδικα, με ενσωματωμένο μικροελεγκτή και εισόδους/εξόδους, και η οποία μπορεί να προγραμματιστεί με τη γλώσσα Wiring (ουσιαστικά πρόκειται για τη γλώσσα προγραμματισμού C++ και ένα σύνολο από βιβλιοθήκες, υλοποιημένες επίσης στην C++). Το Arduino μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη ανεξάρτητων διαδραστικών αντικειμένων αλλά και να συνδεθεί με υπολογιστή μέσω προγραμμάτων σε Processing, Max/MSP, Pure Data, SuperCollider.



Εικόνα 2.1: Μικροελεγκτής Arduino UNO

2.2 Arduino UNO [2]

"Uno" σημαίνει "ένα" στα ιταλικά και επιλέχτηκε για να σηματοδοτήσει την απελευθέρωση του Arduino λογισμικού (IDE) 1.0. Το board UNO και η έκδοση 1.0 του λογισμικού Arduino (IDE) ήταν οι εκδόσεις αναφοράς του Arduino, οι οποίες έχουν πλέον εξελιχθεί σε νεότερες εκδόσεις. Το UNO είναι ένας μικροελεγκτής βασισμένος στο ATmega328P. Όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα, έχει 14 ψηφιακά pins εισόδου/εξόδου (τα 6 εκ των οποίων μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως έξοδοι PWM), 6 αναλογικές εισόδους, έναν κρύσταλλο χαλαζία 16 MHz, μια σύνδεση USB, μια υποδοχή τροφοδοσίας, μια κεφαλίδα εσωτερικού σειριακού προγραμματισμού (in circuit serial programming header ή ICSP header) και ένα κουμπί επαναφοράς. Αναλυτικά, τα τεχνικά χαρακτηριστικά του Arduino UNO φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Microcontroller	ATmega328P
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limit)	6-20V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
PWM Digital I/O Pins	6
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	20 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB (ATmega328P) of which 0.5 KB used by bootloader
SRAM	2 KB (ATmega328P)
EEPROM	1 KB (ATmega328P)
Clock Speed	16 MHz
Length	68.6 mm
Width	53.4 mm
Weight	25 g

Πίνακας 2.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά Arduino

Στα πλαίσια της διατριβής έγινε χρήση του Arduino UNO για τον προγραμματισμό και την αυτοματοποίηση της κίνησης των βηματικών κινητήρων αλλά και για τη δημιουργία ενός τετραγωνικού παλμού συγκεκριμένων χαρακτηριστικών, που καθορίζει το ρυθμό επανάληψης του laser.

Τα παραπάνω θα αναλυθούν διεξοδικά στα επόμενα κεφάλαια.

2.2.1 Arduino UNO και PWM [3], [4]

Όπως αναφέρθηκε, το Arduino μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δώσει ως έξοδο τετραγωνικούς παλμούς μέσω των PWM Pins. Για το Arduino UNO τα PWM pins είναι τα 3, 5, 6, 9, 10 και 11.

Αν για παράδειγμα θέλουμε να παράγουμε έναν παλμό 5V με περίπου 50% duty cycle, μπορούμε να το κάνουμε μέσω της εντολής

```
Analogwrite (myPWMpin, 127);          // Παράγεται ένας παλμός 5V με  
                                         50% duty cycle
```

Σημείωση: Ολοκληρωμένος ο κώδικας για την παραγωγή του παλμού laser παρατίθεται στο Κεφάλαιο 4.

Λειτουργία: Η PWM τιμή των 8 bit (στο παράδειγμα μας το 128), συγκρίνεται με την τιμή ενός μετρητή 8 bit. Όταν ο μετρητής είναι μικρότερος από την PWM τιμή το pin δίνει έξοδο HIGH, ενώ όταν είναι μεγαλύτερος από την PWM τιμή, το pin δίνει έξοδο LOW. Έτσι, στο παράδειγμα αυτό, παράγεται ένα τετραγωνικό σήμα γιατί το pin είναι HIGH για τις μετρήσεις από 0 έως 127 και LOW για τιμές από 128 έως 255, δηλαδή είναι HIGH και LOW για τον ίδιο χρόνο ακριβώς.

Έτσι, η συχνότητα του PWM παλμού καθορίζεται από την ταχύτητα του μετρητή. Το ρολόι του μετρητή είναι ίσο με το ρολόι του συστήματος, διαιρεμένο με μία προκαθορισμένη τιμή (prescaler). Ο prescaler είναι μια τιμή 3 bit η οποία είναι αποθηκευμένη στα τρία λιγότερο σημαντικά bits των καταχωρητών CS02, CS01 και CS00. Υπάρχουν τρεις τέτοιοι καταχωρητές: Ο TCCR0B, ο TCCR1B και ο TCCR2B.

Εφόσον λοιπόν υπάρχουν 3 διαφορετικοί prescalers, τα 6 PWM pins του Arduino χωρίζονται σε 3 ζεύγη με το κάθε ζεύγος να έχει τον δικό του prescaler. Για παράδειγμα, τα pins 6 και 5 ελέγχονται και τα δύο από το TCCR0B, ενώ τα pins 9 και 10 ελέγχονται από TCCR1B, με συνέπεια να μπορούμε να παράγουμε παλμούς διαφορετικής συχνότητας από αυτούς που παράγονται από τα pins 6 και 5. Τα pins 11 και 3 ελέγχονται από το TCCR2B και έτσι μπορούν να τεθούν σε μια τρίτη συχνότητα. Τέλος, δεν μπορούμε να ορίσουμε διαφορετικές συχνότητες για pins που ελέγχονται από τον ίδιο prescaler (π.χ. τα pins 6 και 5 πρέπει να είναι στην ίδια συχνότητα).

Σημείωση: Εάν αλλάξουμε το TCCR0B , επηρεάζονται οι συναρτήσεις millis() και η delay() με αποτέλεσμα να μετράν το χρόνο πιο γρήγορα ή πιο αργά από το κανονικό. Αυτό έχει σα συνέπεια να επηρεάζεται η ταχύτητα των κινητήρων, οπότε

στα πλαίσια της διατριβής προτιμήθηκε η αλλαγή του TCCR1B. Περισσότερες λεπτομέρειες παρατίθενται στο Κεφάλαιο 4.

Οι συχνότητα που παίρνουμε από ένα ζεύγος pin μπορεί να μεταβληθεί διαιρώντας τον timer με τους αριθμούς 1, 8, 64, 256 και 1024. Η βασική εντολή για την επιλογή της συχνότητας π.χ. για τον TCCR0B είναι η:

$TCCR0B = TCCR0B \& 0b11111000 \mid \langle \text{setting} \rangle$; όπου αλλάζουμε την τιμή του setting όπως φαίνεται στους παρακάτω πίνακες:

<u>Setting</u>	<u>Divisor</u>	<u>Συχνότητα PWM</u>
0x01	1	62500
0x02	8	7812.5
0x03	64	976.5625 (default)
0x04	256	244.140625
0x05	1024	61.03515625

Πίνακας 2.2: Συχνότητες pin 5, 6

<u>Setting</u>	<u>Divisor</u>	<u>Συχνότητα PWM</u>
0x01	1	31372.55
0x02	8	3921.16
0x03	64	490.20 (default)
0x04	256	122.55
0x05	1024	30.64

Πίνακας 2.3: Συχνότητες pin 9, 10

<u>Setting</u>	<u>Divisor</u>	<u>Συχνότητα PWM</u>
0x01	1	31372.55
0x02	8	3921.16
0x03	32	980.39
0x04	64	490.20 (default)
0x05	128	245.10
0x06	256	122.55
0x07	1024	30.64

Πίνακας 2.4: Συχνότητες pin 11, 3

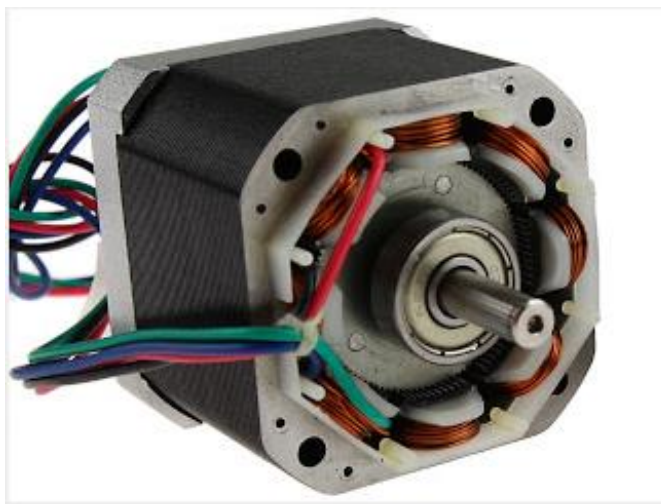
Η ανάλυση για το pin που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή του παλμού, γίνεται στο Κεφάλαιο 4.

Κεφάλαιο 3: Βηματικοί κινητήρες

3.1 Χαρακτηριστικά [5]

Ένας βηματικός κινητήρας είναι μια σύγχρονη μηχανή χωρίς ψήκτρες, με βασικό χαρακτηριστικό το διαχωρισμό μιας πλήρους περιστροφής σε μια σειρά από βήματα. Ένας κινητήρας συνεχούς ρεύματος όταν διεγείρεται από μια DC τάση περιστρέφεται συνεχώς. Ο βηματικός όμως δεν περιστρέφεται διαρκώς. Αντ' αυτού, περιστρέφεται σε βήματα (από όπου πήρε το όνομα του). Κάθε βήμα είναι ένα κλάσμα ενός πλήρους κύκλου. Αυτό το κλάσμα, εξαρτάται κυρίως από τα μηχανικά μέρη του κινητήρα αλλά και από τη μέθοδο της οδήγησης.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ένας τυπικός βηματικός κινητήρας:



Εικόνα 3.1: Βηματικός κινητήρας

Οι βηματικοί κινητήρες διαφέρουν επίσης στον τρόπο με τον οποίο τροφοδοτούνται. Αντί για AC ή DC τάση, οδηγούνται (συνήθως) με παλμούς. Κάθε παλμός μεταφράζεται σε ένα βαθμό περιστροφής. Για παράδειγμα, ένας βηματικός κινητήρας 1.8° , περιστρέφει τον άξονά του 1.8° γωνία για κάθε παλμό που δέχεται. Συχνά, λόγω αυτού του χαρακτηριστικού, οι βηματικοί κινητήρες ονομάζονται επίσης ψηφιακοί κινητήρες.

Οι βηματικές γωνίες λειτουργίας εντοπίζονται κυρίως στην περιοχή από $1,8^\circ$ μέχρι 90° , με ροπές από $1 \mu\text{Nm}$ (σε μικροσκοπικό κινητήρα 3 mm διαμέτρου ρολογιού χειρός) ως και 40 Nm σε κινητήρα διαμέτρου 15 cm. Κινητήρες με βηματική γωνία

45°, για παράδειγμα, παρέχουν μια ανάλυση $360^\circ/45^\circ=8$ βήματα ανά περιστροφή, κινητήρες με βηματική γωνία 1,8° παρέχουν $360^\circ/1,8^\circ=200$ βήματα ανά περιστροφή κ.ο.κ. Η συνολική γωνία που διανύει ο δρομέας είναι ίση με τη βηματική γωνία επί τον αριθμό των βημάτων. Δηλαδή, σε μορφή εξίσωσης:

$$\theta = \beta \cdot \text{βήματα} \quad (3.1)$$

$$\text{Ανάλυση} = \text{βήματα/περιστροφή} = \frac{360^\circ}{\beta} \quad (3.2)$$

όπου β = βηματική γωνία(μοίρες/ παλμό),

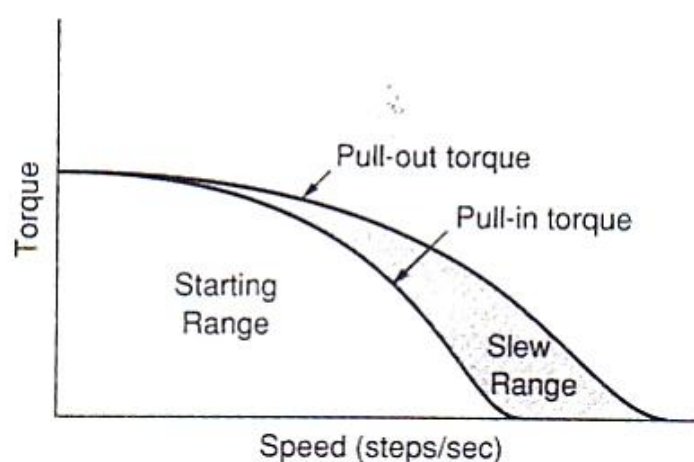
θ = συνολική γωνία που διανύει ο δρομέας(μοίρες)

Η ταχύτητα ενός βηματικού κινητήρα είναι συνάρτηση της βηματικής γωνίας και της βηματικής συχνότητας (ρυθμός παλμών). Συνεπώς,

$$n = \beta \cdot \frac{f_p}{360^\circ} \quad (3.3)$$

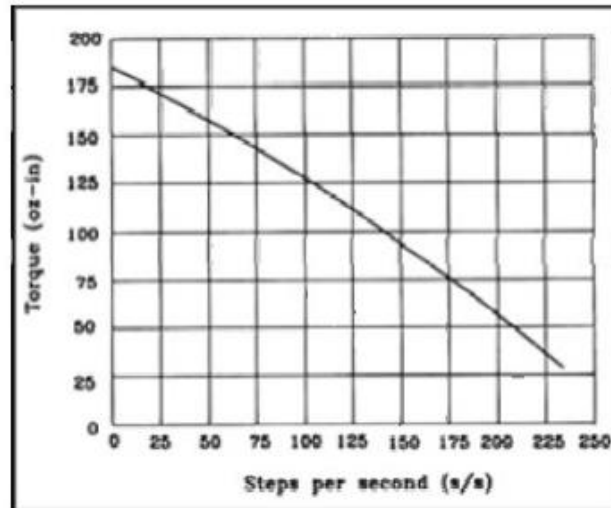
όπου n =ταχύτητα άξονα(r/s) και f_p = βηματική συχνότητα(παλμοί/sec).

Ιδιαίτερη έμφαση πρέπει να δίνεται στη χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας του κινητήρα, έτσι ώστε να επιτυγχάνονται όσο το δυνατόν καλύτερα χαρακτηριστικά περιστροφής. Η ροπή πάνω από την οποία ο βηματικός κινητήρας χάνει βήματα ονομάζεται pull-out torque. Η ροπή κάτω από την οποία ο βηματικός κινητήρας δεν χάνει ποτέ βήματα ονομάζεται pull-in torque. Το εύρος ταχυτήτων μεταξύ της pull-out torque και της pull-in torque ονομάζεται slew range και αναπαριστά μια ασταθή περιοχή λειτουργίας.



Σχήμα 3.1: Γραφική αναπαράσταση της ροπής σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής

Τέλος, στο παρακάτω σχήμα, παρουσιάζεται γραφικά η σχέση μεταξύ της pull-in ροπής και των παλμών (βημάτων) ανά δευτερόλεπτο για ένα συμβατικό βηματικό κινητήρα. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα η ροπή μειώνεται όσο αυξάνονται τα βήματα ανά δευτερόλεπτο.



Σχήμα 3.2: Σχέση μεταξύ της pull-in ροπής και των παλμών (βημάτων) ανά δευτερόλεπτο για ένα συμβατικό βηματικό κινητήρα.

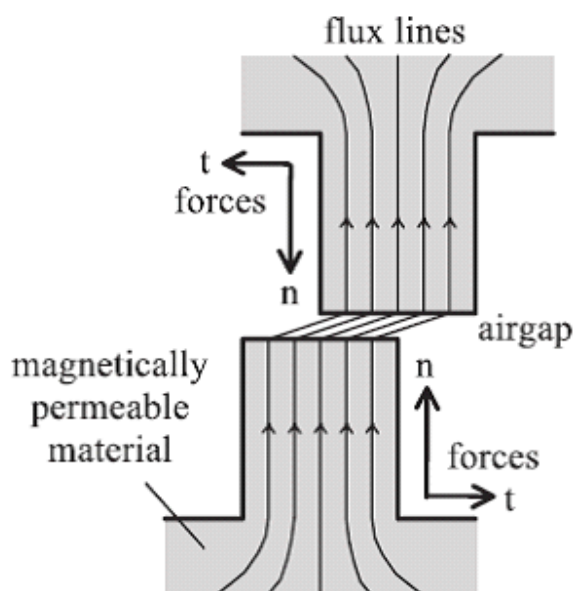
3.2 Αρχή λειτουργίας

Ένα κύριο χαρακτηριστικό των βηματικών κινητήρων είναι ότι έχουν δόντια από μαγνητικά αγωγίμο υλικό και στο σταθερό τους μέρος (στάτη) και στο στρεφόμενο (δρομέα). Ανάλογα με τα διαφορετικά κατασκευαστικά μοντέλα βηματικών κινητήρων, στα οποία θα αναφερθούμε στη συνέχεια, η πηγή της μαγνητικής ροής που διασχίζει το διάκενο αέρος μεταξύ των οδόντων του στάτη και του δρομέα, μπορεί να είναι ένας μόνιμος μαγνήτης, ένα τύλιγμα που διαρρέεται από ρεύμα ή συνδυασμός των δύο. Σε κάθε περίπτωση το αποτέλεσμα είναι το ίδιο· στα δόντια εφαρμόζονται ίσες και αντίθετες δυνάμεις, οι οποίες τείνουν να τα φέρουν σε επαφή και να μειώσουν το διάκενο μεταξύ τους. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται μια τομή ενός τμήματος βηματικού κινητήρα:

Η κύρια συνιστώσα αυτών των δυνάμεων (n) τείνει να μειώσει το διάκενο, αλλά για τους βηματικούς κινητήρες, η πιο "χρήσιμη" δύναμη είναι η μικρότερη επαπτομενική (t) η οποία τείνει να μετακινήσει τα δόντια πλαγίως, σε αντιστοιχία

μεταξύ τους. Όταν η μαγνητική ροή που τα διαπερνά αφαιρείται ή εφαρμόζεται σε άλλο ζεύγος δοντιών, οι δυνάμεις έλξης μηδενίζονται.

Στη συνέχεια γίνεται μια αναφορά στα διάφορα είδη βηματικών κινητήρων, από κατασκευαστικής πλευράς, χωρίς να αναιρείται η βασική αρχή λειτουργίας.



Σχήμα 3.3: Τομή κινητήρα

Οι βηματικοί κινητήρες διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με τα χαρακτηριστικά κατασκευής τους αλλά και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους. Δύο βασικοί τρόποι διαχωρισμού τους, είναι με βάση το δρομέα τους και τα τυλίγματα στο στάτη. Έτσι, με κριτήριο τα τυλίγματα του στάτη, διαχωρίζονται σε unipolar (μονοπολικούς) και bipolar (διπολικούς), ενώ με βάση τη δομή του δρομέα, διακρίνουμε τους κινητήρες σε:

- Μόνιμου μαγνήτη
- Μεταβλητής αντίδρασης
- Υβριδικούς

3.2.1 Διαχωρισμός με βάση τα τυλίγματα στο στάτη [6]

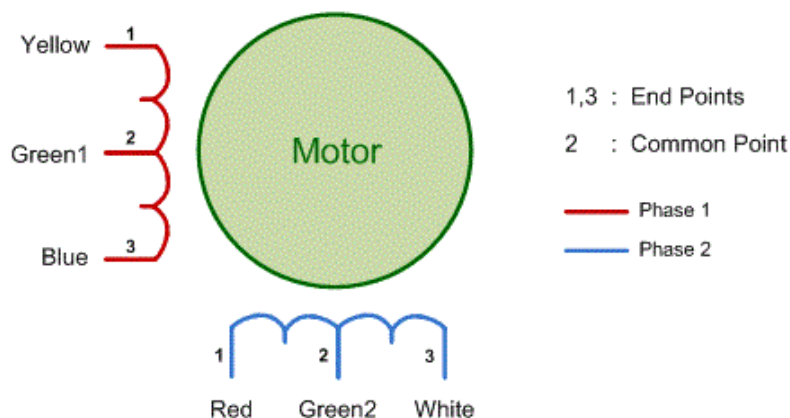
- **Μονοπολικοί:** Οι μονοπολικοί βηματικοί κινητήρες έχουν στο στάτη τυλίγματα κάθε ένα από τα οποία έχει μια κεντρική ελικοτομή (center tap). Τα

κεντρικά καλώδια (ή το κεντρικό καλώδιο) συνδέεται με την τροφοδοσία και τα καλώδια από τις άκρες των τυλιγμάτων γειώνονται.

Ενεργοποιώντας πρώτα το μισό τύλιγμα και στη συνέχεια το άλλο, οι μαγνητικοί πόλοι αλλάζουν. Αυτό σημαίνει ότι το κύκλωμα για έναν κινητήρα διπλής κατεύθυνσης είναι πολύ απλό, και αποτελείται συνήθως από δύο μόνο τρανζίστορ ανά φάση. Ένα σημαντικό μειονέκτημα όμως είναι ότι, κάθε φορά, χρησιμοποιείται μόνο το ήμισυ των διαθέσιμων περιελίξεων. Ως εκ τούτου, η παραγόμενη ροπή είναι πάντα περίπου το ήμισυ της ροπής σε σχέση με τη ροπή που θα παραγόταν από τον αντίστοιχο διπολικό κινητήρα. Αυτό γιατί η ροπή είναι ανάλογη με το ρεύμα που διαρρέει τις περιελίξεις αλλά και με τον αριθμό των περιελίξεων.

Σημείωση: Σύμφωνα με τα παραπάνω, για να επιτύχουμε αύξηση της ροπής π.χ. κατά 20 %, αυξάνουμε το ρεύμα κατά περίπου 20%. Όμως, λόγω του μαγνητικού κορεσμού, δεν υπάρχει κανένα πλεονέκτημα στην αύξηση του ρεύματος πάνω από 2 φορές το ονομαστικό ρεύμα του κινητήρα, αντίθετα με τον τρόπο αυτό μπορούμε να προκαλέσουμε ζημιά στον κινητήρα.

Ο μονοπολικός κινητήρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως διπολικός, μη συνδέοντας το κοινό τύλιγμα. Ένα παράδειγμα μονοπολικού κινητήρα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.4: Μοντέλο μονοπολικού βηματικού κινητήρα

- **Διπολικοί:** Αντίθετα με τους μονοπολικούς κινητήρες οι διπολικοί δεν έχουν κεντρικές ελικοτομές στα τυλίγματα τους, δηλαδή δεν υπάρχει καλώδιο που να ξεκινά από τη μέση ενός τυλιγματος. Σαν αποτέλεσμα αυτού το ρεύμα περνά μέσα από όλο το τύλιγμα και όχι από το μισό όπως συμβαίνει στους μονοπολικούς κινητήρες και έτσι οι διπολικοί κινητήρες παράγουν περισσότερη ροπή στρέψης από τους μονοπολικούς αντίστοιχου μεγέθους. Το πλεονέκτημα αυτό αντισταθμίζεται από το γεγονός ότι οι διπολικοί κινητήρες έχουν πολύ πιο

πολύπλοκο κύκλωμα ελέγχου από ότι οι μονοπολικοί. Τέλος, το ρεύμα στα τυλίγματα των διπολικών κινητήρων μπορεί να ρέει και από τις 2 κατευθύνσεις αλλάζοντας την πολικότητα τους.

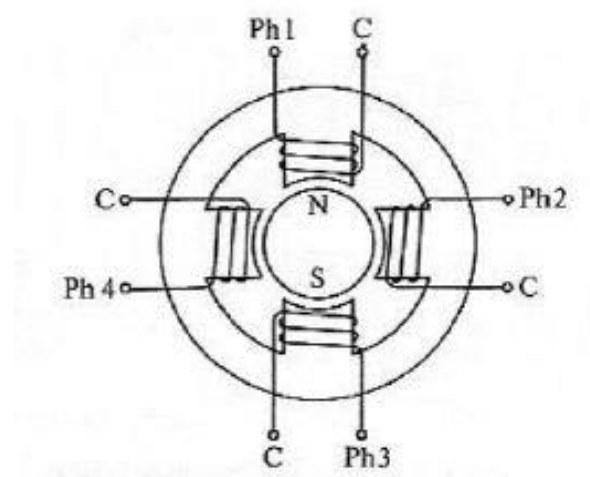
Σύγκριση

Οι διπολικοί κινητήρες έχουν περίπου 30% περισσότερη ροπή στρέψης από τους αντίστοιχους μονοπολικούς. Ο λόγος είναι ότι στους μονοπολικούς κινητήρες μόνο το μισό τύλιγμα ενεργοποιείται κάθε χρονική στιγμή ενώ στους διπολικούς κινητήρες ενεργοποιείται ολόκληρο το τύλιγμα κάθε χρονική στιγμή.

3.2.2 Διαχωρισμός με βάση τη δομή

- **Βηματικοί κινητήρες μόνιμου μαγνήτη [7]**

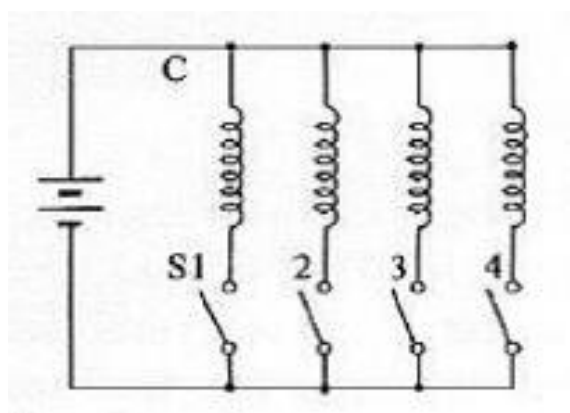
Οι βηματικοί κινητήρες που ενσωματώνουν ένα μόνιμο μαγνήτη στο δρομέα τους ονομάζονται κινητήρες μόνιμου μαγνήτη (Permanent Magnet, PM). Ένα παράδειγμα τυπικού κινητήρα μόνιμου μαγνήτη 4-φάσεων διακρίνεται στο σχήμα 3.5, ενώ ένα βασικό κύκλωμα οδήγησης τέτοιου τύπου κινητήρα παρουσιάζεται στο σχήμα 3.6. Ο ακροδέκτης C σε κάθε φάση, συνδέεται ακολουθιακά με τη θετικής πολικότητας τροφοδοσία. Αν οι φάσεις ενεργοποιούνται με ακολουθία Ph1→Ph2→Ph3... ο δρομέας θα περιστραφεί με ωρολογιακή φορά. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η γωνία βηματισμού είναι προφανώς 90°. Αν ο αριθμός των οδόντων του στάτη και των μαγνητικών πόλων του δρομέα διπλασιαστούν θα προκύψει ένας κινητήρας μόνιμου μαγνήτη 4-φάσεων με 45° βηματική γωνία.



Σχήμα 3.5: Μοντέλο κινητήρα μόνιμου μαγνήτη

Για να μειωθεί περαιτέρω η γωνία βηματισμού σε ένα τέτοιο κινητήρα, ο αριθμός των μαγνητικών πόλων και των δοντιών του στάτη πρέπει να αυξάνεται. Παρόλα αυτά, παρουσιάζεται ένα όριο σε αυτόν τον αριθμό. Ως εναλλακτική, προτείνεται η λύση του υβριδικού κινητήρα, η οποία θα αναλυθεί σε επόμενη ενότητα.

Ένα αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό των βηματικών κινητήρων μόνιμου μαγνήτη είναι το γεγονός ότι ο δρομέας σταματά σε συγκεκριμένες, προκαθορισμένες θέσεις ακόμα και όταν η διέγερση σταματήσει. Αυτό το φαινόμενο περιγράφεται ως "μηχανισμός συγκράτησης" και οι προκαθορισμένες θέσεις καλούνται "θέσεις συγκράτησης". Γενικά, αυτές οι θέσεις συμπίπτουν με τις θέσεις ισορροπίας, αρκεί η μία φάση να είναι ενεργοποιημένη.



Σχήμα 3.6: Τυπικό κύκλωμα οδήγησης ενός PM βηματικού κινητήρα [19]

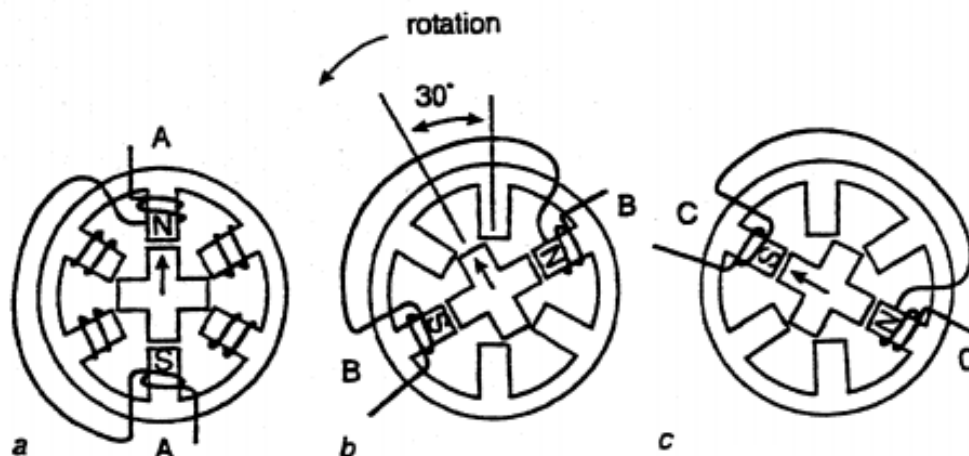
Ο βηματικός κινητήρας μόνιμου μαγνήτη παρουσιάζει δύο σημαντικά μειονεκτήματα: Ο μαγνήτης που ενσωματώνει είναι σχετικά ακριβός και η μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής περιορίζεται από τον παραμένοντα μαγνητισμό του μαγνήτη. Ενώ οι μαγνήτες από φερρίτη είναι συνήθως φθηνοί, δεν παράγουν αρκετή ροπή εξαιτίας του εν γένει μικρού παραμένοντα μαγνητισμού.

- **Βηματικοί κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίδρασης [8], [9]**

Ο βηματικός κινητήρας μεταβλητής αντίδρασης είναι όμοιος με αυτόν του μόνιμου μαγνήτη με τη διαφορά ότι ο δρομέας δεν είναι μαγνητισμένος. Πηνία περιελιγμένα γύρω από τους οδόντες του στάτη παρέχουν μαγνητική έλξη η οποία καθορίζει τη θέση του δρομέα. Όταν τα πηνία αυτά δε διαρρέονται από ρεύμα, ο δρομέας είναι εντελώς ελεύθερος να περιστραφεί. Η ενεργοποίηση ενός ή περισσότερων πηνίων του στάτη έχει ως αποτέλεσμα ο δρομέας να κάνει ένα βήμα μπροστά (ή πίσω) στη θέση ελάχιστης μαγνητικής αντίστασης της διαδρομής που περιλαμβάνει το δρομέα και τη μαγνητισμένη οδόντωση του στάτη.

Έστω ότι ο στάτης αποτελείται από έξι πηνία που έχουν συνδεθεί σε σειρά ανά ομάδες των δύο αντιδιαμετρικά. Έτσι, όταν ένα απ' αυτά παριστάνει τον βόρειο πόλο (N), το αντιδιαμετρικό του παριστάνει τον νότιο πόλο (S). Κατ' αυτόν τον τρόπο προκύπτουν τρία ανεξάρτητα κυκλώματα, γνωστά ως φάσεις, καθεμία από τις οποίες τροφοδοτείται μέσω ξεχωριστού διακόπτη.

Όταν ενεργοποιηθεί η φάση A, δημιουργείται ένα μαγνητικό πεδίο κατά μήκος των πόλων του στάτη, στη φάση A. Έτσι, ο δρομέας έλκεται σε μία θέση όπου ένα ζεύγος πόλων του δρομέα ευθυγραμμίζεται με το πεδίο, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα (a). Όταν διακοπεί η φάση A και ενεργοποιηθεί η φάση B, ο δρομέας περιστρέφεται κατά έτσι ώστε να ευθυγραμμιστεί με τους πόλους στου στάτη στη φάση B (b). Όμοια έχουμε κίνηση του ρότορα κατά με την εναλλαγή από τη φάση B στη φάση C. Με την ακολουθία φάσεων: A B, ο δρομέας κινείται αντιωρολογιακά, ενώ με ακολουθία C, ο δρομέας θα περιστραφεί με τη φορά των δεικτών του ρολογιού.



Σχήμα 3.7: Περιστροφή κινητήρα μεταβλητής αντίδρασης

Στην περίπτωση αυτή, δεν υπάρχει μόνιμος μαγνήτης και έτσι ο ρότορας περιστρέφεται ελεύθερα, χωρίς ροπή συγκράτησης (detent torque).

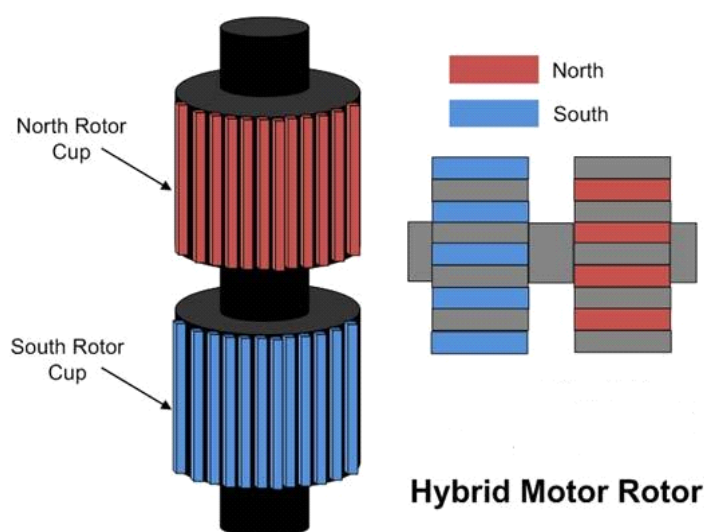
- **Υβριδικοί βηματικοί κινητήρες [9]**

Οι υβριδικοί κινητήρες είναι οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενοι βηματικοί κινητήρες στις βιομηχανικές εφαρμογές. Χρήση υβριδικών κινητήρων έγινε και στα πλαίσια της διατριβής. Ονομάστηκαν έτσι, επειδή συνδυάζουν τα χαρακτηριστικά τόσο από κινητήρες μόνιμου μαγνήτη, όσο και από μεταβλητής αντίδρασης. Έχουν εξαιρετική

δυναμική ροπή, και πολύ μικρό βήμα γωνίας, από 0.9° ως 5° , γεγονός που τους προσδίδει υψηλή ακρίβεια. Τα μηχανικά τους μέρη τους μπορεί να περιστρέφονται σε υψηλές ταχύτητες σε σχέση με τους άλλους τύπους βηματικών κινητήρων. Για τους παραπάνω λόγους, χρησιμοποιούνται σε μηχανές CNC και ρομπότ. Το κύριο μειονέκτημα είναι το κόστος.

Δρομέας

Ο δρομέας τους αποτελείται από 2 ξεχωριστούς οδοντωτούς δίσκους. Ο ένας εξ' αυτών αποτελεί το βόρειο μαγνητικό πόλο και ο άλλος το νότιο. Υπάρχει επίσης και ένας μόνιμος κυλινδρικός μαγνήτης. Οι δύο αυτοί δίσκοι, είναι τοποθετημένοι ο ένας στο βόρειο και ένας στο νότιο μαγνητικό πόλο του μόνιμου μαγνήτη, ενώ οι λόφοι του ενός δίσκου είναι ευθυγραμμισμένοι με τις κοιλάδες του άλλου. Στους κινητήρες που χρησιμοποιήσαμε στην εφαρμογή, οι δίσκοι έχουν 50 δόντια ο καθένας, με συνέπεια να έχουν βήμα 1.8° (ο λόγος θα εξηγηθεί παρακάτω). Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ο δρομέας ενός υβριδικού κινητήρα.

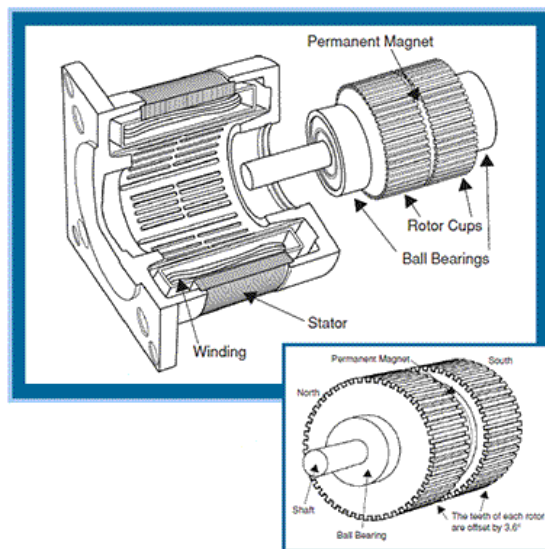


Σχήμα 3.8: Υβριδικός βηματικός κινητήρας

Στάτης

Στο στάτη βρίσκονται τα τυλίγματα. Οι κινητήρες που χρησιμοποιήθηκαν έχουν δύο τυλίγματα στο στάτη και κατά συνέπεια 4 ακροδέκτες. Έτσι ανήκουν στην κατηγορία των διπολικών κινητήρων.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το εσωτερικό ενός διπολικού κινητήρα δύο τυλιγμάτων, με βήμα 1.8° .



Σχήμα 3.9: Εσωτερικό διπολικού κινητήρα δύο τυλιγμάτων, με βήμα 1.8°

Σύγκριση

Οι κινητήρες μεταβλητής αντίστασης έχουν το πλεονέκτημα της απλής σχεδίασης. Οι κινητήρες αυτοί δεν απαιτούν πολύπλοκους ρότορες μόνιμου μαγνήτη και επομένως είναι περισσότερο εύρωστοι από τους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη. Σε όλους τους κινητήρες η ροπή στρέψης μειώνεται με την αύξηση της ταχύτητας τους, όμως στους κινητήρες μεταβλητής αντίστασης αυτή η μείωση είναι λιγότερο έντονη. Με την κατάλληλη σχεδίαση οι κινητήρες μεταβλητής αντίστασης μπορούν να υπερβούν ταχύτητες των 10000 βημάτων/δευτερόλεπτο, ενώ οι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη καθώς και οι υβριδικοί λειτουργούν σε ταχύτητες συνήθως των 1000 βημάτων/δευτερόλεπτο και λίγοι μόνο προσφέρουν χρήσιμη ροπή στρέψης σε ταχύτητες πάνω από 5000 βήματα/δευτερόλεπτο. Η χαμηλή drop-off ροπή των κινητήρων μεταβλητής αντίστασης επιτρέπει την λειτουργία τους χωρίς κιβώτια ταχυτήτων σε εφαρμογές που άλλοι κινητήρες απαιτούν κιβώτια ταχυτήτων.

Παρόλα αυτά, οι κινητήρες μεταβλητής αντίστασης έχουν ένα σημαντικό μειονέκτημα. Με ημιτονοειδές ρεύμα διέγερσης οι υβριδικοί και οι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη, είναι λιγότερο θορυβώδεις σε αντίθεση με τους κινητήρες μεταβλητής αντίστασης που είναι θορυβώδεις ανεξάρτητα από την κυματομορφή που τους οδηγεί. Σαν αποτέλεσμα οι κινητήρες μεταβλητής αντίστασης δεν προτιμώνται σε εφαρμογές που λαμβάνονται σοβαρά υπόψη ζητήματα κραδασμών ή θορύβου. Σε αντίθεση με τους κινητήρες μεταβλητής αντίστασης οι υβριδικοί και οι μόνιμου μαγνήτη δεν μετακινούνται όταν δεν τροφοδοτούνται με ρεύμα διότι ο μόνιμος μαγνήτης τους έλκει τον στάτορα ακόμα και όταν δεν υπάρχει ισχύς. Αυτή η ανασταλτική ροπή (detent torque) είναι επιθυμητή σε κάποιες εφαρμογές αλλά αποτελεί πρόβλημα σε κάποιες άλλες που απαιτούν ομαλή κίνηση.

Στην επιλογή μεταξύ υβριδικών και κινητήρων μόνιμου μαγνήτη σημαντικό ρόλο παίζουν δυο ζητήματα, αυτά του κόστους και της ανάλυσης. Οι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη ανήκουν στην κατηγορία των πιο φθηνών κινητήρων ενώ οι υβριδικοί κινητήρες έχουν ρυθμούς βήματος υψηλότερους από τους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη αν και λίγοι παράγουν χρήσιμη ροπή σε ρυθμούς υψηλότερους από 5000 βήματα/δευτερόλεπτο.

Σύγκριση-Συμπεράσματα [5]

Η κατασκευή των βηματικών κινητήρων είναι σχετικά απλή, το μόνο κινούμενο μέρος είναι ο δρομέας, ο οποίος δεν έχει τυλίγματα. Συγκρατείται σε συγκεκριμένες θέσεις ισορροπίας με την επίδραση μαγνητικής δύναμης μεταξύ στάτη και δρομέα. Η βηματική γωνία εξαρτάται απ' την γεωμετρία των οδοντώσεων και την διάταξη των τυλιγμάτων του στάτη. Ο απλός τύπος:

$$\beta = \frac{360^\circ}{\text{οδόντες δρομέα} \times \text{φάσεις στάτη}} \quad (3.4)$$

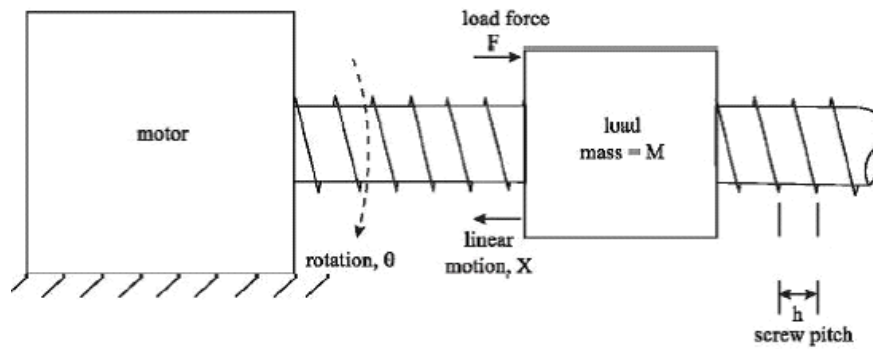
μας δίνει τη βηματική γωνία για οποιουδήποτε τύπου βηματικό κινητήρα.

Ένας τυπικός κινητήρας με βηματική γωνία $1,8^\circ$ μοίρες για παράδειγμα, έχει 50 δόντια στο δρομέα και 4 φάσεις στο στάτη.

Οι κινητήρες συνδέονται με το κύκλωμα οδήγησης καθώς και με τον κοχλία για την επίτευξη της γραμμικής κίνησης που επιθυμούμε.

3.3 Φορτίο συνδεδεμένο με κοχλία κίνησης (leadscrew)

Μερικές από τις πιο συνηθισμένες εφαρμογές των βηματικών κινητήρων απαιτούν γραμμική κίνηση. Να σημειωθεί ότι έχουν προταθεί γραμμικοί βηματικοί κινητήρες που μεταφράζουν ψηφιακά σήματα σε γραμμικά βήματα [20] αλλά η εφαρμογή τους είναι αρκετά περιορισμένη. Στις περισσότερες περιπτώσεις τα φορτία κινούνται γραμμικά μέσω κοχλία κίνησης (leadscrew) όπως στην εφαρμογή της παρούσας εργασίας. Στο σχήμα 3.10 φαίνεται μια τέτοια διάταξη.



Σχήμα 3.10: Σύνδεση κινητήρα με κοχλία

Μια πλήρης περιστροφή του δρομέα προκαλεί γραμμική κίνηση του φορτίου ίση με το βήμα pitch του κοχλία, άρα για μια γωνιακή μετατόπιση θ :

$$\frac{\theta}{2\pi} = \frac{x}{h} \quad (3.5)$$

Αν το φορτίο υπόκειται σε μια δύναμη F τότε, υποθέτοντας ότι οι τριβές θεωρούνται αμελητέες, για να μετακινηθεί το φορτίο κατά απόσταση x απαιτείται έργο ίσο με $F \cdot x$, το οποίο θα πρέπει να ισούται με το έργο της ροπής φορτίου στον κινητήρα κατά τη γωνιακή μετατόπιση θ :

$$F \cdot x = T_L \cdot \theta \quad (3.6)$$

$$T_L = F \cdot \frac{x}{\theta} = F \cdot \frac{h}{2\pi} \quad (3.7)$$

Στο επόμενο κεφάλαιο γίνεται αναλυτικός υπολογισμός του χρόνου που απαιτείται για το άπλωμα της σκόνης.

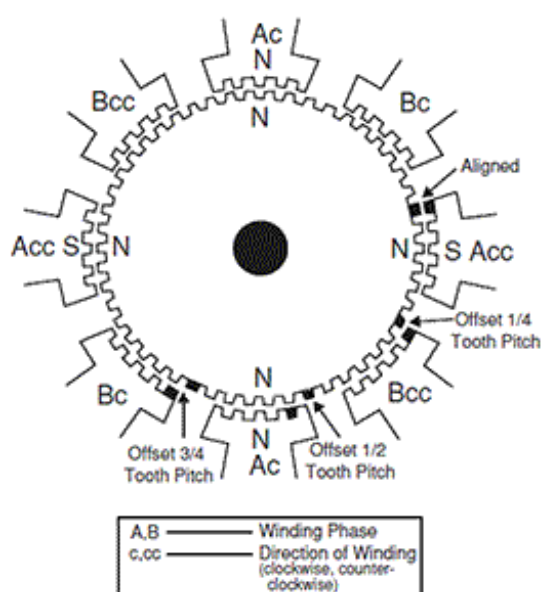
3.4 Εφαρμογή [10]

3.4.1 Χαρακτηριστικά κινητήρων

Οι κινητήρες που χρησιμοποιήθηκαν είναι διπολικοί, υβριδικοί, με γωνία βήματος 1.8° . Ο δρομέας αποτελείται από 2 δίσκους των 50 οδόντων, οι οποίοι περικλείουν ένα μόνιμο μαγνήτη. Προκύπτει λοιπόν ότι η απόσταση 2 διαδοχικών οδόντων σε ένα δίσκο είναι $360^\circ/50 = 7,2^\circ$.

Οι δύο δίσκοι έχουν προσανατολιστεί έτσι ώστε οι οδόντες του ενός δίσκου να έχουν μια απόκλιση από τους οδόντες του άλλου κατά $3,6^\circ$. Στο στάτη είναι τοποθετημένα τα δύο τυλίγματα τα οποία αποτελούν και τις 2 φάσεις (Α και Β) του στάτη. Κάθε φάση τυλίγεται έτσι, ώστε να δημιουργούνται μαγνητικοί πόλοι οι οποίοι όταν απέχουν 180° να έχουν ίδια πολικότητα, ενώ οι πόλοι με 90° διαφορά να έχουν αντίθετη πολικότητα. Όταν το ρεύμα σε μια φάση αντιστρέφεται, αντιστρέφεται και η πολικότητα.

Όπως φαίνεται στο σχήμα, όταν ενεργοποιείται η φάση Α, οι περιελίξεις στις 12:00 και 6:00 είναι βόρειοι πόλοι ενώ οι περιελίξεις στις 3:00 και 9:00 είναι νότιοι. Τα τυλίγματα 12 και 6 θα προσελκύουν τα δόντια του μαγνητικού νότιου άκρου του ρότορα, ενώ οι περιελίξεις 3 και 9 προσελκύουν τα δόντια του βόρειου μαγνητικού πόλου του. Η επιθυμητή κατεύθυνση του ρότορα καθορίζει το επόμενο σύνολο των πόλων που ενεργοποιούνται.



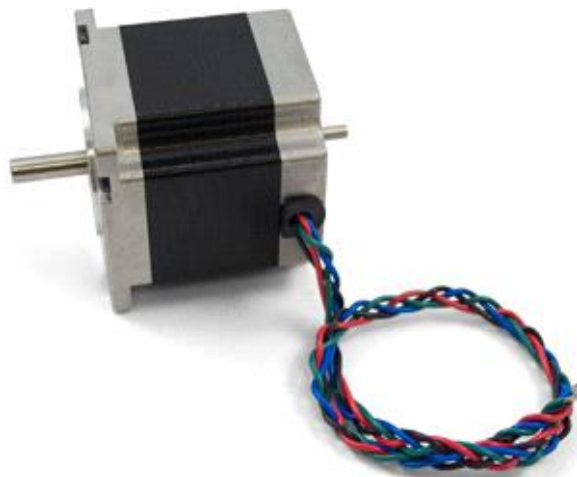
Σχήμα 3.11: Φάσεις στάτη και οδόντες δρομέα

Ο driver ελέγχει την αλληλουχία των φάσεων. Όπως αναφέρθηκε, υπάρχουν 50 δόντια επί του ρότορα και έτσι το βήμα μεταξύ των δοντιών είναι 7.2° . Καθώς ο κινητήρας κινείται, ορισμένοι οδόντες του ρότορα είναι σε ευθυγράμμιση με τους οδόντες του στάτη. Οι υπόλοιποι οδόντες του ρότορα είναι εκτός ευθυγράμμισης σε $3/4$, $1/2$ ή $1/4$ του βήματος δοντιού. Όταν ο κινητήρας κάνει ένα βήμα, θα προχωρήσει στην επόμενη πλησιέστερη θέση όπου οι οδόντες του ρότορα και του στάτορα είναι ευθυγραμμισμένοι. Κατά συνέπεια, ο δρομέας θα μετακινηθεί $1/4$ των $7,2^\circ$, δηλαδή κατά 1.8° . Η κατεύθυνση περιστροφής του άξονα καθορίζεται από τη σειρά ενεργοποίησης των πηνίων.

Πιο συγκεκριμένα, οι κινητήρες που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της διατριβής είναι ο Nema 23 57STH56-2804B για τη μετακίνηση του συστήματος απλώματος σκόνης και ο Nema 17 42BYGH1861A-C για την περιστροφή του ράουλου κατά τη μετακίνηση του συστήματος απλώματος σκόνης.

- **Nema-23**

Ο κινητήρας NEMA-23 φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Ο πίσω άξονας είναι εκτεθειμένος, ώστε να μπορεί να τοποθετηθεί encoder ή σύνδεσμος με τον άξονα γραμμικής κίνησης.



Εικόνα 3.2: Nema-23

Είναι διπολικός κινητήρας με γωνία βήματος 1.8° , ενώ παράγει $12,6 \text{ kg-cm}$ ροπής (holding torque) στα $2,8\text{A}$. Τα ακριβή ηλεκτρικά και φυσικά χαρακτηριστικά του κινητήρα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Electrical Properties

Recommended Voltage	12 V DC
Rated Current	2.8 A
Coil Resistance	900 mΩ
Phase Inductance	2.5 mH

Physical Properties

Shaft Diameter	6.4 mm
Rear Shaft Diameter	3.9 mm
Mounting Plate Size	NEMA - 23
Weight	686 g
Number of Leads	4
Wire Length	300 mm

Πίνακας 3.1: Ηλεκτρικές και φυσικές ιδιότητες Nema-23

Ο κινητήρας NEMA-17 είναι όμοιος κατασκευαστικά με τον NEMA-23 και παράγει 4.8 Kg-cm ροπής στα 2.5A. Οι ιδιότητες του κινητήρα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Electrical Properties

Recommended Voltage	12 V DC
Rated Current	2.5 A
Coil Resistance	1.3 Ω
Phase Inductance	1.8 mH

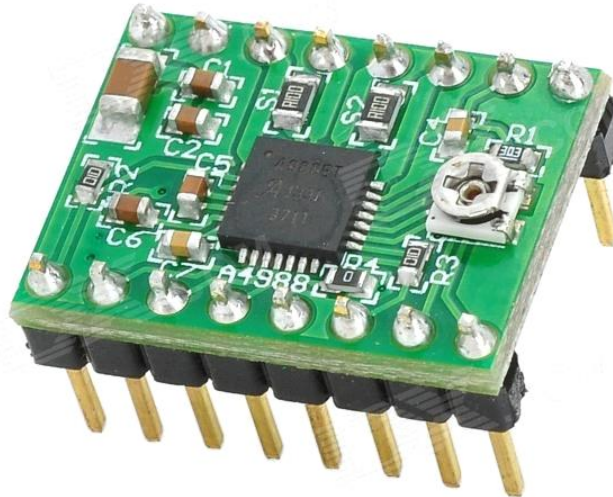
Physical Properties

Shaft Diameter	5 mm
Mounting Plate Size	NEMA - 17
Weight	332 g
Number of Leads	4
Wire Length	300 mm

Πίνακας 3.2: Ηλεκτρικές και φυσικές ιδιότητες Nema-17

3.4.2 Drivers και συνδέσεις [11]

Ο driver που χρησιμοποιήθηκε για την οδήγηση των 2 κινητήρων είναι ο A4988, ο οποίος φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



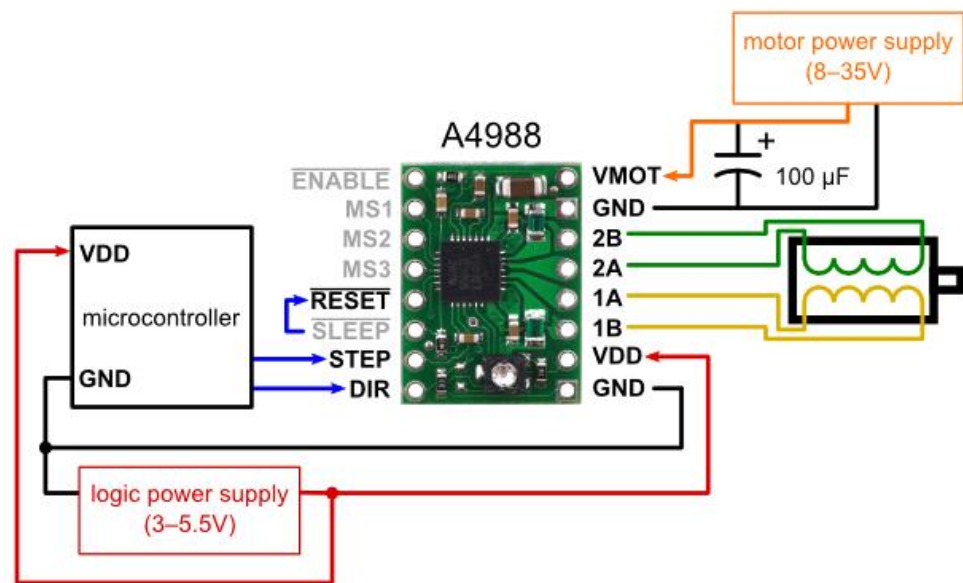
Εικόνα 3.3: Driver A4988

Ο A4988 driver χρησιμοποιείται για την οδήγηση διπολικών βηματικών κινητήρων. Διαθέτει προστασία υπερέντασης αλλά και υπερθέρμανσης ενώ έχει πέντε διαφορετικές διαβαθμίσεις microstepping (πλήρους βήματος, 1/2, 1/4, 1/8, αλλά και 1/16 της γωνίας βήματος). Στην εφαρμογή βέβαια χρησιμοποιήσαμε full step και δεν έγινε χρήση microstepping καθώς αυτό δεν ήταν απαραίτητο. Λειτουργεί με τάση εισόδου από 8 V έως 35 V (η οποία τάση χρησιμοποιείται για τα τυλίγματα των κινητήρων) και μπορεί να παρέχει έως περίπου 1 A ανά φάση. Στην εφαρμογή έγινε χρήση ψύκτρας με συνέπεια να μπορούμε να λάβουμε έως και 2A/ φάση σύμφωνα με τον κατασκευαστή.

Πολύ σημαντικό είναι το γεγονός ότι μπορούμε να αυξομειώσουμε την ένταση του ρεύματος με ένα ποτενσιόμετρο, το οποίο μας επιτρέπει να χρησιμοποιούμε τάσεις πάνω από την ονομαστική τάση του βηματικού κινητήρα, έτσι ώστε να επιτύχουμε υψηλότερο ρυθμό βήματος.

- **Pins και συνδέσεις driver [11]**

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται αναλυτικά τα pins του A4988 και οι βασικές συνδέσεις. Όπως είναι εμφανές, το board αποτελείται από 16 pins.



Σχήμα 3.13: Συνδέσεις κυκλωμάτων

Συνδέσεις

- VMOT: Συνδέεται με την τροφοδοσία και αφορά την τάση η οποία εφαρμόζεται στους κινητήρες. Στην εφαρμογή χρησιμοποιήσαμε 12V που είναι και η συνιστώμενη τάση λειτουργίας των δύο κινητήρων.
- GND: Συνδέεται με τη γείωση της τροφοδοσίας.
- Μεταξύ της γείωσης και της τροφοδοσίας παρεμβάλλεται ένας πυκνωτής 100μF: Το board χρησιμοποιεί κεραμικούς πυκνωτές χαμηλής ισοδύναμης αντίστασης σειράς, γεγονός που τους καθιστά ευπαθείς σε καταστροφικές αιχμές τάσης LC. Αυτό γιατί οι πυκνωτές χαμηλού ESR έχουν το πλεονέκτημα ότι εμφανίζουν μικρή αντίσταση στις επιθυμητές υψηλές συχνότητες λειτουργίας, δε μπορούν να μετριάσουν όμως τις αιχμές τάσης οι οποίες συμβαίνουν κυρίως κατά την έναρξη λειτουργίας. Υπό συνθήκες, οι αιχμές αυτές μπορεί να υπερβούν τη μέγιστη ονομαστική τάση των 35 V και να βλάψουν μόνιμα το board, ακόμη και όταν η τάση τροφοδοσίας του κινητήρα είναι τόσο χαμηλά όσο τα 12V της εφαρμογής μας. Ένας τρόπος για την προστασία του driver από τέτοιες αιχμές είναι η τοποθέτηση ενός μεγάλου (τουλάχιστον 47 μF) ηλεκτρολυτικού πυκνωτή ανάμεσα στο VMOT και τη γείωση. Με τον τρόπο αυτό, η μεγάλη χωρητικότητα του πυκνωτή αποτρέπει την πολύ γρήγορη αλλαγή της τάσης αλλά και το υψηλό ESR το αποτρέπει από το να τραβάει τόσο πολύ αρχικό ρεύμα.

- Τα pins 1A και 1B συνδέονται στα άκρα της μίας φάσης του κινητήρα, ενώ τα pins 2A και 2B στην άλλη φάση.
- V_{DD}: Παροχή λογικής ισχύος 5V. Είναι η τροφοδοσία των λογικών κυκλωμάτων του driver, η οποία παρέχεται από τα 12V της τροφοδοσίας με τη βοήθεια voltage regulators.
- GND: Γείωση της λογικής τροφοδοσίας. Μεγάλη προσοχή πρέπει να δοθεί στο ότι πρέπει να έχουμε κοινή γείωση με τον ελεγκτή για τη σωστή λειτουργία των κινητήρων.
- DIR: Στο pin DIR συνδέουμε μια έξοδο του arduino καθορίζοντας με τον τρόπο αυτό τη σειρά εναλλαγής εφαρμογής τάσης στις φάσεις των κινητήρων, μεταβάλλοντας έτσι τη φορά περιστροφής τους.
- STEP: Κάθε παλμός στην είσοδο STEP αντιστοιχεί σε ένα βήμα του βηματικού κινητήρα κατά την κατεύθυνση που επιλέγεται από το pin DIR. Τον παλμό αυτό τον δίνουμε μέσω του μικροελεγκτή. Σημειώνουμε ότι τα pins STEP και DIR δε συνδέονται με κάποια τάση στο εσωτερικό, έτσι δε θα πρέπει να τα αφήνουμε ασύνδετα, καθώς μπορεί να οδηγηθούν σε “floating”, δηλαδή σε μια κατάσταση η οποία είναι ασταθής και μπορεί να οδηγήσει σε απρόβλεπτες μεταβολές της κατάστασής τους π.χ. λόγω παρεμβολών ή θορύβου. Αν κάποιος επιθυμεί απλά περιστροφή του κινητήρα προς μία μόνο κατεύθυνση, μπορεί να συνδέσει το pin DIR άμεσα με 5V ή GND.
- MS1, MS2, MS3: Τα pins αυτά χρησιμοποιούνται για microstepping. Ανάλογα με το αν είναι HIGH ή LOW επιλέγουμε και το επίπεδο microstepping. Σημειώνεται ότι τα MS1 και MS3 έχουν εσωτερικές pull-down αντιστάσεις 100 KΩ, ενώ το MS2 μία εσωτερική των 50 KΩ. Έτσι, αφήνοντας αυτά τα pins επιλογής microstepping χωρίς σύνδεση, οδηγούμαστε σε κατάσταση full step. Για να λειτουργήσει σωστά το microstepping, θα πρέπει να θέσουμε το όριο ρεύματος αρκετά χαμηλά. Σε αντίθετη περίπτωση, ο κινητήρας θα παραλείπει microsteps. Στον παρακάτω πίνακα βλέπουμε τους συνδυασμούς για διαφορετικά επίπεδα microstepping:

MS1	MS2	MS3	Microstep Resolution	Excitation Mode
L	L	L	Full Step	2 Phase
H	L	L	Half Step	1-2 Phase
L	H	L	Quarter Step	W1-2 Phase
H	H	L	Eighth Step	2W1-2 Phase
H	H	H	Sixteenth Step	4W1-2 Phase

Πίνακας 3.3: Επίπεδα Microstepping

Στα πλαίσια της εργασίας, επιθυμούμε full step, άρα δεν τα συνδέουμε πουθενά (λογικό LOW).

Το board έχει τρεις διαφορετικές εισόδους για τον έλεγχο των διαφόρων καταστάσεων του: RESET, SLEEP, και ENABLE.

- **ENABLE:** Αυτή η είσοδος ενεργοποιεί ή απενεργοποιεί όλες τις εξόδους των FET. Όταν τίθεται σε λογικό HIGH, οι έξοδοι είναι απενεργοποιημένες. Όταν τεθεί σε λογικό LOW, ο εσωτερικός έλεγχος ενεργοποιεί τις εξόδους, όπως απαιτείται. Το pin αυτό δε συνδέεται πουθενά, άρα ουσιαστικά είναι σε λογικό LOW, με συνέπεια την ενεργοποίηση των εξόδων.
- **RESET:** Όλες οι εισοδοί STEP αγνοούνται έως ότου η είσοδος RESET τεθεί σε λογικό HIGH. Σημειώνεται ότι το pin αυτό οδηγείται σε “floating” που σημαίνει ότι αν δεν το χρησιμοποιούμε, πρέπει να το θέσουμε σε λογικό HIGH, έτσι ώστε να ενεργοποιήσουμε το board. Έτσι, το συνδέουμε μόνιμα στα 5V που παίρνουμε από την έξοδο του ρυθμιστή τάσης.
- **SLEEP:** Για να ελαχιστοποιηθεί η κατανάλωση ενέργειας όταν ο κινητήρας δεν είναι σε χρήση, αυτή η είσοδος απενεργοποιεί ένα μεγάλο μέρος των εσωτερικών κυκλωμάτων συμπεριλαμβανομένων και των FET εξόδου. Ένα λογικό LOW στο SLEEP pin βάζει το A4988 σε κατάσταση αναστολής λειτουργίας. Ένα λογικό HIGH επιτρέπει την κανονική λειτουργία, καθώς και εκκίνηση.

Στους παρακάτω πίνακες φαίνονται αναλυτικά οι συνδέσεις:

<u>Driver A4988 pins</u>	<u>Συνδέσεις</u>
V_{MOT}	12V του τροφοδοτικού
GND	Γείωση του τροφοδοτικού
2B	Τύλιγμα 2 του κινητήρα
2A	Τύλιγμα 2 του κινητήρα
1A	Τύλιγμα 1 του κινητήρα
1B	Τύλιγμα 1 του κινητήρα
V_{DD}	12V του τροφοδοτικού μέσω ρυθμιστή τάσης 12 σε 5V
GND	Κοινή γείωση
ENABLE	Καμία σύνδεση
MS1	Καμία σύνδεση
MS2	Καμία σύνδεση

MS3	Καμία σύνδεση
RESET	12V του τροφοδοτικού μέσω ρυθμιστή τάσης 12 σε 5V
SLEEP	Σύνδεση με το pin 7 του arduino
STEP	Pin 6 του arduino
DIR	Pin 5 του arduino

Πίνακας 3.4: Συνδέσεις Nema 23 57STH56-2804B (Xaxis) με τον driver και το Arduino

<u>Driver A4988 pins</u>	<u>Συνδέσεις</u>
V_{MOT}	12V του τροφοδοτικού
GND	Γείωση του τροφοδοτικού
2B	Τύλιγμα 2 του κινητήρα
2A	Τύλιγμα 2 του κινητήρα
1A	Τύλιγμα 1 του κινητήρα
1B	Τύλιγμα 1 του κινητήρα
V_{DD}	12V του τροφοδοτικού μέσω ρυθμιστή τάσης 12 σε 5V
GND	Κοινή γείωση
ENABLE	Καμία σύνδεση
MS1	Καμία σύνδεση
MS2	Καμία σύνδεση
MS3	Καμία σύνδεση
RESET	12V του τροφοδοτικού μέσω ρυθμιστή τάσης 12 σε 5V
SLEEP	Σύνδεση με το pin 4 του arduino
STEP	Pin 3 του arduino
DIR	Pin 2 του arduino

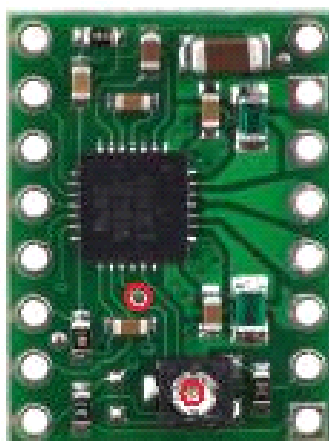
Πίνακας 3.5: Συνδέσεις Nema 17 42BYGH1861A-C (Roller) με τον driver και το Arduino

3.4.3 Αύξηση ταχύτητας κινητήρων

Για την επίτευξη υψηλού ρυθμού βήματος, η παροχή τάσης στον κινητήρα πρέπει να είναι υψηλότερη από αυτή που θα ήταν επιτρεπτή χωρίς ενεργό περιορισμό ρεύματος. Για παράδειγμα, ένας τυπικός βηματικός κινητήρας με αντίσταση πηνίου 5Ω στη συχνότητα διέγερσης, μπορεί να διαρρέεται από ένα μέγιστο ρεύμα 1 A , το οποίο υποδεικνύει μέγιστη τάση στον κινητήρα τα 5 V . Εφαρμόζοντας τώρα στον κινητήρα αυτό υψηλότερη τάση (π.χ. 12 V) με σκοπό να επιτύχουμε υψηλότερο ρυθμό βήματος, μας οδηγεί στον ενεργό περιορισμό του ρεύματος κάτω από 1 A για να μην καταστρέψουμε τον κινητήρα.

Το A4988 υποστηρίζει τον εν λόγω ενεργό περιορισμό. Για να θέσουμε το νέο όριο ρεύματος αρκεί να χρησιμοποιήσουμε το ποτενσιόμετρο το οποίο βρίσκεται πάνω στην πλακέτα. Το ερώτημα που τίθεται είναι το πόσο θα περιορίσουμε το ρεύμα σε περίπτωση που χρησιμοποιούμε διαφορετική τάση για τον κινητήρα και ποια είναι η σχέση που συνδέει τα δύο αυτά μεγέθη. Ένας τρόπος για να ρυθμίσουμε το όριο του ρεύματος είναι να θέσουμε τον driver σε κατάσταση full step και να μετρήσουμε το ρεύμα που ρέει μέσα από το ένα πηνίο του κινητήρα χωρίς να κάνουμε stepping από την είσοδο STEP. Το μετρούμενο ρεύμα θα είναι 0,7 φορές το τρέχον όριο αφού στη λειτουργία full step, το ρεύμα και τα δύο πηνία των κινητήρων περιορίζεται στο 70% της τρέχουσας ρύθμισης ορίου.

Ένας άλλος τρόπος για να ρυθμίσουμε το όριο της έντασης του ρεύματος είναι να μετρήσουμε την τάση στο "ref" pin και να υπολογίσουμε το όριο του ρεύματος που προκύπτει (οι τρέχουσες αντιστάσεις είναι 0.05Ω). Η τάση του ref pin είναι προσβάσιμη σε μία διαδρομή που είναι κυκλωμένη στο κάτω μέρος του κυκλώματος όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 3.4: Ref pin

Το όριο ρεύματος σχετίζεται με την τάση αναφοράς ως εξής:

$$\text{Current limit} = 2,5 \times V_{\text{REF}}$$

Έτσι, για παράδειγμα, εάν η τάση αναφοράς είναι 0,3 V, το τρέχον όριο είναι 0,75 A. Όπως προαναφέρθηκε, σε λειτουργία πλήρους βήματος, το ρεύμα μέσω των πηνίων περιορίζεται στο 70% του ορίου ρεύματος. Έτσι, για να πάρουμε ρεύμα πηνίου 1,2 A σε λειτουργία πλήρους βήματος, το όριο ρεύματος θα πρέπει να είναι $1,2 \text{ A} / 0,7 = 1,7 \text{ A}$, το οποίο αντιστοιχεί σε ένα $V_{\text{REF}} 1,7 \text{ A} / 2.5 = 0.68 \text{ V}$.

3.4.4 Κώδικας Arduino για την κίνηση των δύο βηματικών κινητήρων

Τα pins του arduino που χρησιμοποιήσαμε για τον έναν κινητήρα είναι τα A₀, A₁ ως αναλογικές εισόδους και τα pins 7, 8 και 9 σαν ψηφιακές εξόδους.

Ο κώδικας του Arduino είναι ο παρακάτω:

```
#include <AccelStepper.h>

#define ENABLE_XAXIS 7
#define ENABLE_ROLLER 4

int RIGHT = analogRead(A0);
int LEFT = analogRead(A1);
int OPEN = analogRead(A2);

AccelStepper Xaxis(1, 6, 5);          /* Θέτουμε το pin 6 ως step και το pin 5
                                     ως direction. Εδώ το sleep είναι το pin 7
                                     */
AccelStepper Roller(1, 3, 2);        /* Θέτουμε το pin 3 ως step και το pin 2
                                     ως direction. Εδώ το sleep είναι το pin 4
                                     */

int spd = 800;                       // Η τρέχουσα ταχύτητα σε steps/sec

int sign ;                           // 1, 0 ή -1

void setup()
{
  Xaxis.setMaxSpeed(1500);           // Μέγιστη ταχύτητα(steps/sec)
  Roller.setMaxSpeed(1500);
```

```

pinMode(ENABLE_XAXIS,OUTPUT);      // Θέτουμε το pin 7 ως έξοδο
pinMode(ENABLE_ROLLER,OUTPUT);     // Θέτουμε το pin 4 ως έξοδο
}

void loop()
{
    if (OPEN >900){
        if (LEFT > 900 && RIGHT < 900){
            sign = -1;
            digitalWrite(ENABLE_XAXIS,HIGH);
            digitalWrite(ENABLE_ROLLER,HIGH);
        }

        if (LEFT < 900 && RIGHT > 900){
            sign = 1;
            digitalWrite(ENABLE_XAXIS,HIGH);
            digitalWrite(ENABLE_ROLLER,HIGH);
        }

        if (RIGHT <= 900 && LEFT <= 900){
            sign = 0;
            digitalWrite(ENABLE_XAXIS,LOW);
            digitalWrite(ENABLE_ROLLER,LOW);
        }

        Xaxis.setSpeed((-1)*sign * spd);
        Roller.setSpeed((-1)*sign * spd/8);
    }

    Xaxis.runSpeed();
    Roller.runSpeed();
}

```

Παρατηρήσεις

1) **#include <AccelStepper.h> [12]**

Όπως βλέπουμε, ο κώδικας ξεκινά με την εντολή: #include <AccelStepper.h>

Ενώ λοιπόν θα μπορούσαμε να κάνουμε χρήση της βιβλιοθήκης “Stepper”, προτιμήθηκε να εισαχθεί μέσω της παραπάνω εντολής η “AccelStepper”.

Η AccelStepper δεν είναι τίποτα άλλο από μια αντικειμενοστραφή διεπαφή για βηματικούς κινητήρες 2, 3 ή 4 pins και βελτιώνει την ήδη υπάρχουσα βιβλιοθήκη του Arduino “Stepper” σε διάφορους τομείς, όπως για παράδειγμα:

- Υποστηρίζει επιτάχυνση και επιβράδυνση

- Υποστηρίζει πολύ χαμηλές ταχύτητες
- Υποστηρίζει την ταυτόχρονη λειτουργία 2 ή περισσότερων stepper κινητήρων

2) Στη συνέχεια δημιουργούμε δύο αντικείμενα της AccelStepper. Το πρώτο το ονομάζουμε Xaxis αφού αναφέρεται στην κίνηση του κινητήρα στον άξονα X, ενώ το δεύτερο το ονομάζουμε Roller καθώς αναφέρεται στην κίνηση του Roller.

Για τον κινητήρα Xaxis, καλούμε λοιπόν αρχικά την AccelStepper(1, 6, 5), όπου το 1 δηλώνει ότι ο κινητήρας ελέγχεται από κάποιο driver. Αν για παράδειγμα είχαμε έλεγχο από μια H-bridge θα βάζαμε αντί για 1, το 2. Η παράμετρος 6 δηλώνει το step pin, ενώ το 5 το dir pin.

Ομοίως για τον κινητήρα Roller, καλούμε την AccelStepper(1, 3, 2), όπου η παράμετρος 3 δηλώνει το pin step και η παράμετρος 2 το pin dir.

3) #define ENABLE_XAXIS 7, #define ENABLE_ROLLER 4

Η εντολή #define επιτρέπει στον προγραμματιστή να δώσει ένα όνομα σε μια σταθερή τιμή, πριν το πρόγραμμα μεταγλωττιστεί. Ο compiler θα αντικαταστήσει τις παραπομπές σε αυτές τις σταθερές με την καθορισμένη τιμή κατά τη μεταγλώττιση. Για τον κινητήρα Xaxis θέτουμε το pin 7 ως ENABLE_MOTOR. Όμοια για το Roller θέτουμε το pin 4 ως ENABLE_ROLLER.

Παρατήρηση: Τα pin 4 και 7 συνδέονται στο SLEEP pin των driver. Με τον τρόπο αυτό, όταν γίνονται HIGH, ενεργοποιείται ένα μεγάλο μέρος των εσωτερικών κυκλωμάτων των board, συμπεριλαμβανομένων και των FET εξόδου, με αποτέλεσμα την ενεργοποίηση των board, ενώ με λογικό LOW απενεργοποιούνται. Έτσι, θέτουμε τα pin 4 και 7 LOW, όταν δεν έχουμε κίνηση των βηματικών κινητήρων για να αποφύγουμε την υπερθέρμανση των driver.

4) Στις μεταβλητές RIGHT, LEFT και OPEN, καταχωρείται η τιμή των αναλογικών εισόδων A₀, A₁ και A₂ αντίστοιχα.

Παρατήρηση 1: Το Arduino έχει ένα μετατροπέα αναλογικό σε ψηφιακό των 10 bits γεγονός που σημαίνει ότι η αναλογική είσοδος θα μετατραπεί σε μια ψηφιακή είσοδο με τιμή από 0 έως 1023. Η τιμή 1023 αντιστοιχεί σε 5V και η τιμή 0 σε 0V. Στις εντολές χρησιμοποιούμε την τιμή 900 (π.χ. if (OPEN < 900)) και όχι το 1023 γιατί μια πολύ μικρή διακύμανση μπορεί να επηρεάσει τα αποτελέσματα μας).

Παρατήρηση 2: Δεν κάνουμε κάποια σύνδεση στην αναλογική είσοδο OPEN.

5) Xaxis.setSpeed((-1)*sign * spd);

Με την εντολή αυτή ρυθμίζουμε την ταχύτητα, σε βήματα ανά δευτερόλεπτο((-1)*sign * spd). Η ταχύτητα που θα έχουμε θα είναι 0 ή 800 ή -800 steps/sec. Πραγματική κίνηση προκαλείται από την καλούμενη runSpeed().

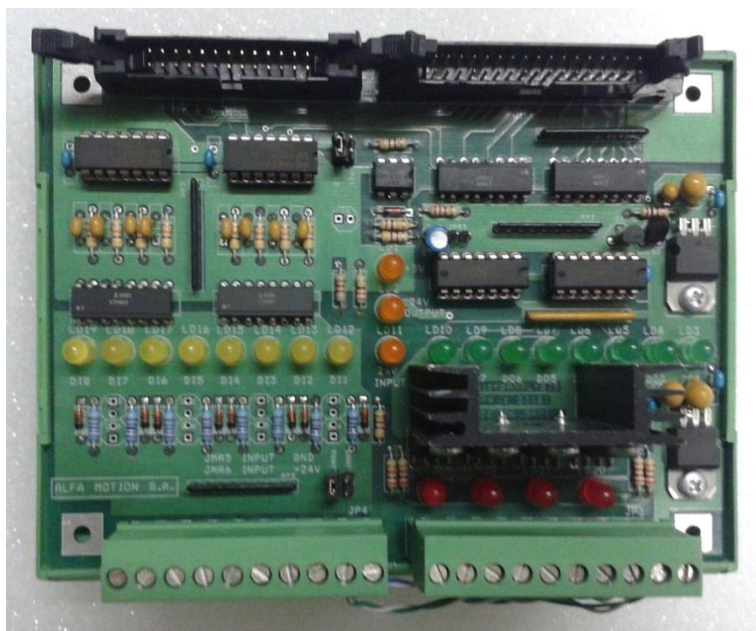
6) Xaxis.runSpeed();

Κάνει update στον κινητήρα. Η runSpeed() πρέπει να καλείται επαναληπτικά για την επίτευξη της κίνησης του κινητήρα.

Παρατήρηση 1: Κατά το άπλωμα της σκόνης ενεργοποιούνται ταυτόχρονα και οι δύο κινητήρες, ένας για την κίνηση κατά τον Χ άξονα και ο άλλος για την περιστροφική κίνηση του ράουλου.

Παρατήρηση 2: Η αναλογική είσοδος A₀ συνδέεται με την έξοδο 1 του αξεσουάρ της PMAC 8 IN/OUT Board και είναι υπεύθυνη για τη δεξιόστροφη περιστροφή των κινητήρων, ενώ η αναλογική είσοδος A₁ συνδέεται με την έξοδο 2 του 8 IN/OUT Board και είναι υπεύθυνη για την αριστερόστροφη περιστροφή των κινητήρων.

Το PMAC 8 IN/OUT Board φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



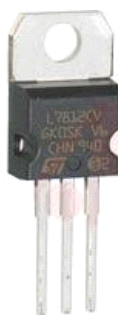
Εικόνα 3.5: PMAC 8 IN/OUT Board

<u>Αναλογική είσοδος Arduino</u>	<u>Έξοδος 24V PMAC 8 IN/OUT Board</u>
A ₀	1
A ₁	2

Πίνακας 3.6: Συνδέσεις A₀ και A₁

Συνδέσεις

Η ενεργοποίηση των βηματικών κινητήρων γίνεται από τις εξόδους 1 και 2 του 8 IN/OUT Board της PMAC. Οι εξοδοί όμως αυτές δίνουν τάση 24V. Το arduino μπορεί να δεχτεί στις αναλογικές εισόδους του έως 5V. Κατά συνέπεια έγινε χρήση ρυθμιστών τάσης (voltage regulators) με σκοπό τον υποβιβασμό της τάσης από τα 24 στα 5V. Ο πρώτος λοιπόν ρυθμιστής τάσης, ο L7812CV υποβιβάζει την τάση από τα 24 στα 12V ενώ ο δεύτερος, ο L7805CV συνδεόμενος σε σειρά με τον πρώτο υποβιβάζει την τάση από τα 12 στα 5V. Σημειώνεται ότι θα μπορούσε να γίνει απευθείας ο υποβιβασμός από τα 24 στα 5V. Η κλιμακωτή μείωση έγινε για λόγους μείωσης κόστους. Ο L7812CV φαίνεται στο επόμενο σχήμα:



Εικόνα 3.6: Ρυθμιστής τάσης L7812CV

3.4.5 Υπολογισμός γραμμικής κίνησης

Κινητήρας συνδεδεμένος με τον κοχλία: Όπως είδαμε και στον κώδικα, η ταχύτητα του κινητήρα Xaxis είναι 800 steps/sec, ενώ η κάθε περιστροφή περιλαμβάνει 200 steps. Αυτό συνεπάγεται ότι η ταχύτητα που έχουμε είναι **4 revs/sec**.

Μια πλήρης περιστροφή του δρομέα προκαλεί γραμμική κίνηση του φορτίου ίση με το βήμα pitch του κοχλία, άρα για μια γωνιακή μετατόπιση θ :

$$\frac{\theta}{2\pi} = \frac{x}{h} \rightarrow x = \frac{\theta \cdot h}{2\pi} \quad (3.8)$$

το βήμα (pitch) του κοχλία είναι 0.4cm. Κατά συνέπεια, για μια γωνιακή μετατόπιση $\theta = 2\pi$, από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι θα έχουμε γραμμική μετατόπιση $x = 4 \text{ mm}$. Έτσι, η γραμμική ταχύτητα θα είναι **$U_{\text{linear}} = 4 = 16 \text{ mm/sec}$** .

Η συνολική γραμμική κίνηση για το άπλωμα της σκόνης είναι 370 mm. Έτσι, για μια πλήρη κίνηση προς τη μία κατεύθυνση απαιτείται χρόνος **$t = 370/16 = 23.125 \text{ sec}$** .

Σημείωση: Η ταχύτητες των δύο κινητήρων που έχουμε επιλέξει είναι ενδεικτικές και μπορούν να μεταβληθούν σύμφωνα με τις ανάγκες της κάθε εφαρμογής.

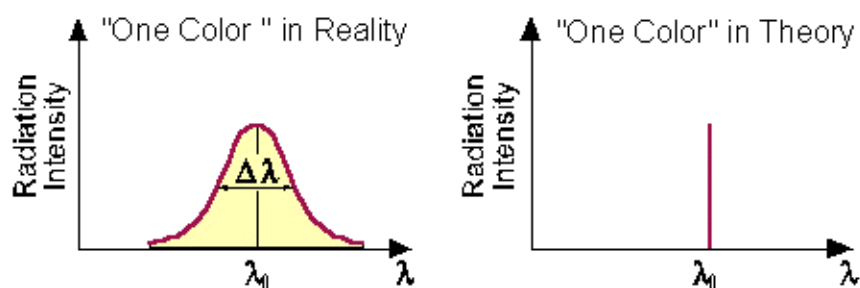
Κεφάλαιο 4: Laser

4.1 Εισαγωγή στα laser [14]

Ο όρος λέιζερ ή λήιζερ προέρχεται από το αγγλικό ακρωνύμιο Laser: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation που αποδίδεται στα ελληνικά ως *“Ενίσχυση φωτός με εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας”* και αναφέρεται τόσο στις συσκευές που την παράγουν όσο και στην αντίστοιχη ακτινοβολία. Τα λέιζερ αποτελούνται από το ενεργό υλικό και την οπτική κοιλότητα. Το ενεργό υλικό μετατρέπει την εξωτερική ενέργεια σε δέσμη φωτός. Συνήθως είναι υλικό με συγκεκριμένο μέγεθος, σύσταση, καθαρότητα και μορφή που παράγει φως μέσω εξαναγκασμένης εκπομπής, η οποία αποτελεί κβαντομηχανική διαδικασία που προτάθηκε από τον Αλβέρτο Αϊνστάιν για να ερμηνεύσει το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Το ενεργό υλικό αντλεί ενέργεια από μία εξωτερική πηγή. Τέτοιες πηγές μπορεί να είναι ηλεκτρικές ή φωτεινές, όπως η λυχνία έκλαμψης (flash lamp) ή κάποια άλλη πηγή λέιζερ.

Τα λέιζερ παράγουν συμφασικό, μονοχρωματικό φως (δηλαδή φως με συγκεκριμένο μήκος κύματος - χρώμα), το οποίο διαδίδεται σε μία συγκεκριμένη κατεύθυνση, σχηματίζοντας στενές δέσμες. Αντίθετα, οι συνηθισμένες πηγές φωτός όπως οι λαμπτήρες πυράκτωσης παράγουν μη-σύμφωνο φως προς όλες τις διευθύνσεις και επιπλέον, έχουν μεγάλο φασματικό εύρος.

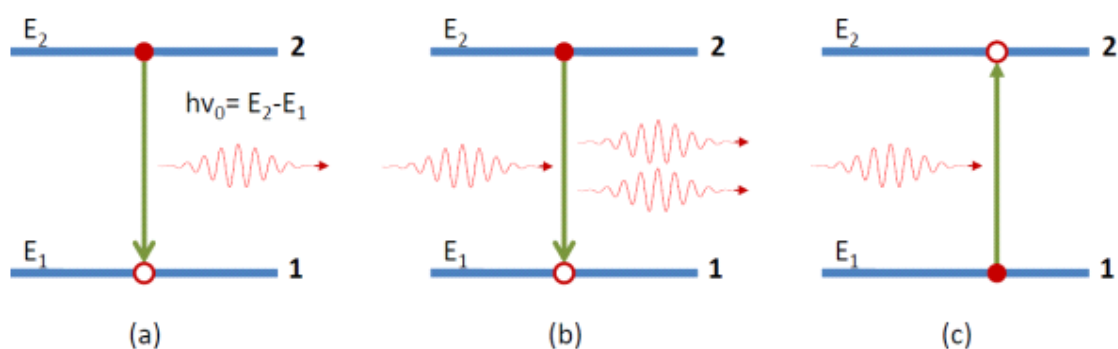
Βέβαια, στην πράξη το ένα μήκος κύματος «συνοδεύεται» αναπόφευκτα από μια πολύ περιορισμένη ζώνη με μήκη κύματος λίγο μικρότερα και λίγο μεγαλύτερα του κεντρικού (φάσμα πολύ περιορισμένου εύρους), όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 4.1: Ζώνη μήκους κύματος

4.1.1 Βασικές έννοιες-Αυθόρμητη κι εξαναγκασμένη εκπομπή, απορρόφηση [15]

Έστω το απλουστευμένο μοντέλο των δύο ενεργειακών σταθμών ενός ατόμου (ή μορίου ή άλλου φυσικού συστήματος) με ενέργειες E_1 και E_2 με $E_1 < E_2$. Ας υποθέσουμε επιπλέον ότι η E_1 είναι και η βασική του κατάσταση και ότι το σύστημα βρίσκεται στη διεγερμένη κατάσταση E_2 . Ένα άτομο παραμένει στη διεγερμένη αυτή κατάσταση για πολύ σύντομο χρονικό διάστημα, της τάξης των 10^{-8} sec. Από την κβαντομηχανική γνωρίζουμε ότι μετά από κάποιο χρονικό διάστημα θα αποδιεγερθεί στην βασική κατάσταση E_1 ελευθερώνοντας ενέργεια $E_2 - E_1$. Στην περίπτωση που η ενέργεια εκπεμφθεί με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, η διαδικασία ονομάζεται **αυθόρμητη εκπομπή** (spontaneous emission) και χαρακτηρίζεται από την εκπομπή ενός φωτονίου ενέργειας $h\nu_0 = E_2 - E_1$ (σχήμα 4.2(a)). Η μετάβαση όμως στη βασική κατάσταση μπορεί να γίνει και μη-ακτινοβολητικά, για παράδειγμα με κρούσεις με τα γειτονικά άτομα και σε αυτή την περίπτωση η διαδικασία ονομάζεται μη-ακτινοβολητική μετάβαση (non-radiative decay).



Σχήμα 4.2: (a) Αυθόρμητη εκπομπή, (b) Εξαναγκασμένη εκπομπή, (c) Απορρόφηση

Έστω τώρα ότι το σύστημα βρίσκεται στην κατάσταση E_2 κι ένα ΗΜ κύμα συχνότητας $\nu = \nu_0$ το διαταράσσει. Από την κβαντομηχανική γνωρίζουμε πως υπάρχει μη μηδενική πιθανότητα να μεταβεί στην βασική κατάσταση εκπέμποντας ένα φωτόνιο $h\nu_0 = E_2 - E_1$ εξαιτίας του διαταρακτικού ΗΜ πεδίου (σχήμα 4.2(b)). Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **εξαναγκασμένη εκπομπή** (stimulated emission).

Η θεμελιώδης διαφορά μεταξύ αυθόρμητης και εξαναγκασμένης εκπομπής είναι ότι κατά την εξαναγκασμένη εκπομπή τα άτομα εκπέμπουν ΗΜ κύματα που βρίσκονται σε συμφωνία φάσης με το προσπίπτον ΗΜ πεδίο κι εκπέμπονται στην ίδια

διεύθυνση. Αντίθετα, στην αυθόρμητη εκπομπή τα εκπεμπόμενα ΗΜ κύματα δεν έχουν σταθερή σχέση φάσης με το προσπίπτον ΗΜ πεδίο (μη-συμφωνία φάσης) κι εκπέμπονται προς όλες τις κατευθύνσεις.

Τέλος έστω ότι το σύστημα βρίσκεται στην κατάσταση E_1 κι ένα ΗΜ κύμα συχνότητας $\nu = \nu_0$ το διαταράσσει. Από την κβαντομηχανική γνωρίζουμε πως υπάρχει μη μηδενική πιθανότητα το σύστημα μας να μεταβεί από την βασική κατάσταση E_1 στην διεγερμένη κατάσταση E_2 αυξάνοντας την ενέργειά του κατά $E_2 - E_1$ εξαιτίας του διαταρακτικού ΗΜ πεδίου (σχήμα 4.2 (c)). Το φαινόμενο ονομάζεται **απορρόφηση** (absorption).

Στις παραπάνω διαδικασίες μπορούμε να αντιστοιχίσουμε πιθανότητες μετάβασης οι οποίες θα μας βοηθήσουν στην ποιοτική αλλά και ποσοτική κατανόηση του μηχανισμού του laser. Έστω λοιπόν ο N_i ο αριθμός των ατόμων (ή μορίων) ανά μονάδα όγκου που βρίσκεται στην κατάσταση E_i . Ο N_i θα ονομάζεται από εδώ και στο εξής πληθυσμός (population) της κατάστασης i .

- Αυθόρμητη εκπομπή: Ο ρυθμός μετάβασης (decay rate) του πληθυσμού της κατάστασης E_2 είναι ανάλογος του πληθυσμού N_2 .

$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{SP} = -AN_2 \quad (4.1)$$

Ο συντελεστής A είναι μια θετική σταθερή που ονομάζεται ρυθμός της αυθόρμητης εκπομπής ή συντελεστής Einstein A (θα δούμε σύντομα γιατί) κι εξαρτάται μόνο από τη συγκεκριμένη μετάβαση. Η ποσότητα $\tau_{SP} = 1/A$ είναι ο χρόνος ζωής της αυθόρμητης εκπομπής.

Μη-ακτινοβολητική μετάβαση:

$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{NR} = -\frac{N_2}{\tau_{NR}} \quad (4.2)$$

όπου η ποσότητα είναι ο χρόνος ζωής της μη-ακτινοβολητικής μετάβασης που εξαρτάται τόσο από τη συγκεκριμένη μετάβαση αλλά και τον περιβάλλοντα χώρο.

- Εξαναγκασμένη εκπομπή:

$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{ST} = -W_{21}N_2 \quad (4.3)$$

Ο συντελεστής είναι ο ρυθμός της εξαναγκασμένης εκπομπής, με διαστάσεις αντίστροφου χρόνου κι εξαρτάται τόσο από την συγκεκριμένη μετάβαση αλλά και από την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

- Απορρόφηση

$$\left(\frac{dN_1}{dt}\right)_A = -W_{12}N_1 \quad (4.4)$$

Θεωρώντας επίπεδα κύματα για την προσπίπτουσα ακτινοβολία ισχύει:

$$W_{12} = \sigma_{12}F \quad (4.5)$$

$$W_{21} = \sigma_{21}F \quad (4.6)$$

όπου σ είναι η ενεργός διατομή (cross section) της μετάβασης μετρούμενη σε μονάδες επιφάνειας η οποία εξαρτάται μόνο από τη συγκεκριμένη μετάβαση και μόνο. Η ποσότητα F είναι η ροή (flux) των φωτονίων της ΗΜ ακτινοβολίας μετρούμενη σε μονάδες αντίστροφης επιφάνειας επί αντίστροφου χρόνου.

Εάν οι δυο στάθμες είναι μη εκφυλισμένες τότε ισχύει $W_{12} = W_{21}$ και άρα $\sigma_{12} = \sigma_{21}$. Εάν οι δυο στάθμες είναι εκφυλισμένες με εκφυλισμό (degeneracy) g_1 και g_2 αντίστοιχα, τότε ισχύει $g_2 W_{21} = g_1 W_{12}$ και άρα $g_2 \sigma_{21} = g_1 \sigma_{12}$.

4.1.2 Η ιδέα του laser [15]

- Ενισχυτής

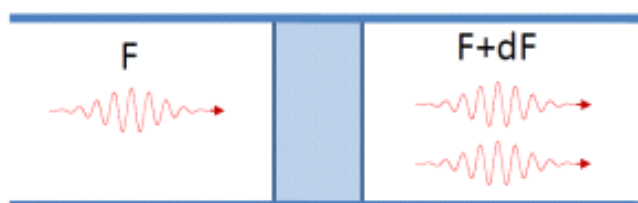
Κάθε ενεργειακό επίπεδο έχει μια «μέση ζωή» που το χαρακτηρίζει. Με την παρέλευση μιας μέσης ζωής θα έχουν απομείνει στη διεγερμένη αυτή κατάσταση: $1/e$ ή 37% των διεγερμένων ατόμων.

Η κβαντική θεωρία περιγράφει τη μετάβαση από ένα ενεργειακό επίπεδο σε άλλο ως στατιστική πιθανότητα. Η πιθανότητα μετάβασης από υψηλότερο σε χαμηλότερο ενεργειακό επίπεδο είναι αντιστρόφως ανάλογη της μέσης ζωής του υψηλότερου ενεργειακού επιπέδου. Η μετάβαση πραγματοποιείται ακολουθώντας κάποιους συγκεκριμένους κανόνες επιλογής (π.χ. οι πιθανότητες διαμοιράζονται μεταξύ των μεταβάσεων από το επίπεδο $4 \rightarrow 3$ ή $4 \rightarrow 2$ ή $4 \rightarrow 1$). Όταν η πιθανότητα μετάβασης (εγκατάλειψης) από ένα ενεργειακό επίπεδο είναι χαμηλή και η μέση ζωή του της τάξης του 10^{-3} sec, το ενεργειακό επίπεδο καλείται **μετασταθερό** και μπορεί να συγκεντρώσει μεγάλο πληθυσμό ατόμων. **Η ύπαρξη μετασταθερού ενεργειακού επιπέδου είναι απαραίτητη ιδιότητα του υλικού που θα εκπέμψει την ακτινοβολία laser.**

Γενικότερα ισχύει πως ο πληθυσμός των υψηλότερων ενεργειακών καταστάσεων είναι μικρότερος από τον αντίστοιχο χαμηλότερης ενεργειακής στάθμης. Σε ένα υλικό φυσιολογικής κατάστασης, ένα προσπίπτον φωτόνιο θα απορροφηθεί από ένα άτομο που θα «ανεβεί» σε ψηλότερη ενεργειακή κατάσταση-στάθμη. Όταν όμως σε ένα υλικό προσφερθεί αρκετή ενέργεια είναι δυνατόν να παρατηρηθεί «αντιστροφή πληθυσμών» δηλαδή τουλάχιστον ένα ενεργειακό επίπεδο να αποκτήσει (προσωρινό) πληθυσμό μεγαλύτερο από τα «κατώτερα» από αυτό επίπεδα. Σε κατάσταση αντιστροφής πληθυσμών μεταξύ δυο ενεργειακών επιπέδων υπάρχει μεγάλη πιθανότητα ότι τυχόν πρόσπτωση φωτονίου κατάλληλης ενέργειας θα εξαναγκάσει το διεγερμένο άτομο να επιστρέψει στο χαμηλότερο ενεργειακό επίπεδο εκπέμποντας ένα δεύτερο, ίδιο, φωτόνιο.

Η αντιστροφή πληθυσμών είναι μια από τις προ-απαιτούμενες καταστάσεις για τη δημιουργία της ακτινοβολίας laser. Η αύξηση του αριθμού των διεγερμένων ατόμων καλείται άντληση (pumping) και αν γίνει με ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία καλείται **οπτική άντληση**.

Έστω λοιπόν σύστημα δύο ενεργειακών σταθμών E_1 και E_2 όπως αυτό του σχήματος 4.2 δεδομένου υλικού, με εκφυλισμούς σταθμών g_1 και g_2 και πληθυσμούς N_1 και N_2 , αντίστοιχα. Έστω επίσης επίπεδο ΗΜ κύμα φωτονικής ροής F που διαδίδεται κατά τον άξονα z του υλικού όπως στο σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.3: Διάδοση ΗΜ κύματος φωτονικής ροής

Η στοιχειώδης αλλαγή στη ροή dF κατά το στοιχειώδες μήκος dz θα ισούται με τον αριθμό των φωτονίων που παρήχθησαν με την εξαναγκασμένη εκπομπή μείον εκείνων που απορροφήθηκαν. Παραλείπουμε τις συνεισφορές από την αυθόρμητη εκπομπή και τις μη-ακτινοβολητικές μεταβάσεις επειδή είναι πολύ πιο ασθενείς. Επομένως μπορούμε να γράψουμε:

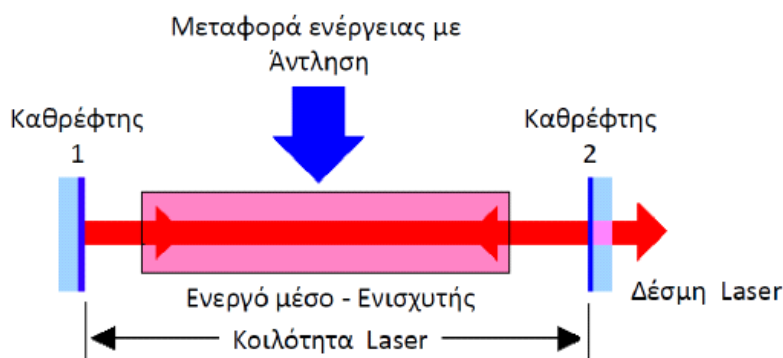
$$\frac{dF}{dz} = W_{12}N_2 - W_{21}N_1 = \sigma_{21}FN_2 - \sigma_{12}FN_1 = F\sigma_{21}\left[N_2 - \frac{\sigma_{12}}{\sigma_{21}}N_1\right] = F\sigma_{21}\left[N_2 - \frac{g_2}{g_1}N_1\right] \quad (4.7)$$

Η σχέση μας δείχνει ότι το υλικό μας συμπεριφέρεται ως *ενισχυτής* (amplifier) όταν 0 , δηλ. όταν $N_2 > N_1$. Στην αντίθετη περίπτωση συμπεριφέρεται ως απορροφητής. Αξίζει να σημειώσουμε ότι για $N_2 < N_1$, το υλικό είναι διαφανές στη συγκεκριμένη ακτινοβολία (transparent).

- **Σύστημα ανάδρασης – κοιλότητα laser**

Για να μπορέσει να δημιουργηθεί μια δέσμη laser από έναν ενισχυτή χρειάζεται ένα σχήμα θετικής ανάδρασης που ονομάζεται **ταλαντωτής** (oscillator). Αυτό επιτυγχάνεται τοποθετώντας το ενεργό μέσο ανάμεσα σε δυο καθρέφτες υψηλής ανακλαστικότητας (βλ. Σχήμα 4.4). Η δομή αυτή είναι γνωστή ως **κοιλότητα laser** (laser cavity). Καθώς το ΗΜ κύμα, το οποίο ταξιδεύει κατά τη διεύθυνση των δύο καθρεφτών, ανακλάται μπρος και πίσω, πάνω στους καθρέφτες, ενισχύεται κάθε φορά που περνά από το ενεργό μέσο – ενισχυτή. Κατασκευάζοντας τον ένα από

τους δυο καθρέφτες μερικώς διαπερατό στη συχνότητα της ΗΜ ακτινοβολίας, προκύπτει η δέσμη laser στην έξοδο του καθρέφτη.



Σχήμα 4.4: Κοιλότητα laser

- **Οπτική κοιλότητα και μορφή της ακτινοβολίας**

Είναι γνωστό από τη θεωρία των κυμάτων ότι όταν δύο κύματα με παραπλήσια πλάτη ταλάντωσης και ίδια συχνότητα κινούνται στην ίδια ευθεία με αντίθετες κατευθύνσεις, «προστίθενται» δημιουργώντας μια ταλάντωση που φαίνεται σταθερή στο χώρο: Ένα στάσιμο κύμα.

Ένα ΗΜ κύμα στο ενεργό υλικό της συσκευής laser που κινείται από αριστερά προς τα δεξιά, ανακλάται από τον δεξί καθρέφτη και αρχίζει να κινείται (από τα δεξιά) προς τα αριστερά. Επομένως δημιουργούνται ζεύγη κυμάτων ίδιας συχνότητας και πλάτους που κινούνται σε αντίθετες κατευθύνσεις. Δηλαδή έχουμε στάσιμα κύματα κατά μήκος του οπτικού (κεντρικού) άξονα του ενεργού υλικού (και) της οπτικής κοιλότητας.

- **Το μήκος της οπτικής κοιλότητας [16]**

Για να διατηρηθεί η ίδια φάση των κυμάτων στο επίπεδο του καθρέφτη, θα πρέπει η απόσταση ανάμεσα στους καθρέφτες (L) να είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος (λ).

$$\text{Δηλαδή } \lambda_m = \frac{2L}{m} \quad (4.8)$$

όπου m ο αριθμός των μισών μηκών κύματος και

- λ_m το μήκος κύματος στη συγκεκριμένη λειτουργία.

$$\text{Ισχύει, ταυτόχρονα και } c = \lambda_0 \nu = \eta \lambda_m \nu_m \quad (4.9)$$

όπου

- c η ταχύτητα της ακτινοβολίας στο κενό
- λ_0 το μήκος κύματος της ακτινοβολίας στο κενό
- n ο δείκτης διάθλασης του ενεργού υλικού

$$\text{Έτσι, } \lambda_m = \frac{\lambda_0}{n} \quad (4.10)$$

Από τις (4.8) και (4.9) έχουμε ότι στη βασική λειτουργία ($m = 1$ και $\lambda = 2L$) της οπτικής κοιλότητας θα ισχύει $v = \frac{c}{2nL}$ (4.11)

$$\text{και στις υπόλοιπες } v = m \frac{c}{2nL} \quad (4.12)$$

Επίσης προϋπόθεση για τη διατήρηση των στάσιμων κυμάτων είναι να αντιστοιχούν «κόμβοι» στο επίπεδο των καθρεφτών.

Όταν $m = 1$ οι κόμβοι είναι δύο, ένας σε κάθε καθρέφτη. Όταν $m = 2$, οι κόμβοι είναι τρεις (προστίθεται ένας στη μέση), κ.ο.κ.

Προσοχή χρειάζεται στους υπολογισμούς και όσον αφορά στον δείκτη διάθλασης. Θεωρείται $n = \text{σταθερό}$ για όλο το μήκος της οπτικής κοιλότητας. Πολλές φορές όμως οι καθρέφτες δεν τοποθετούνται ακριβώς στα άκρα του ενεργού υλικού και οι υπολογισμοί περιπλέκονται.

Για την παραγωγή ακτινοβολίας laser στο ορατό φάσμα, ο αριθμός m πρέπει να είναι πολύ μεγάλος. Π.χ. στο αέριο Laser He-Ne η χαρακτηριστική του ερυθρά ακτινοβολία με $\lambda = 0,6328 \mu\text{m}$ εκπέμπεται όταν $m = 10^6$ ($L = 30 \text{ cm}$).

Καθώς ΗΜ κύματα διαπερνούν το ενεργό υλικό πολλές φορές, υφίστανται σημαντική απορρόφηση. Επομένως εξέρχονται της συσκευής μόνο τα κύματα που έχουν ενισχυθεί αρκετά ώστε να επιζήσουν.

Η ελάχιστη ενίσχυση που είναι απαραίτητη για τη λειτουργία της συσκευής laser λέγεται κατώφλι ενίσχυσης. Η ύπαρξη του κατωφλίου ενίσχυσης περιορίζει τον αριθμό των κόμβων που είναι επιτρεπτοί για τη δημιουργία δέσμης laser. Ανάλογα με την προτιθέμενη εφαρμογή του laser γίνεται και η επιλογή των παραμέτρων στην κατασκευή της διάταξης.

4.2 Laser YLIA M20 [18]

Το laser που χρησιμοποιούμε είναι το YLIA M20. Είναι ένα laser ινών Υπερβίου, το οποίο εκπέμπει το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας του στα 1064nm. Το laser αυτό αποτελείται από έναν ταλαντωτή και διάφορα στάδια ενίσχυσης. Οι παλμοί παράγονται από το στάδιο του ταλαντωτή και έχουν ένα δεδομένο ρυθμό επανάληψης. Τα στάδια ενίσχυσης είναι φτιαγμένα από ίνες διπλής επίστρωσης Υπερβίου που αντλούνται από διόδους ημιαγωγών.

Τα **πλεονεκτήματα** του λέιζερ ίνας έναντι άλλων τύπων περιλαμβάνουν:

- Το φως είναι ήδη σε μία εύκαμπτη ίνα: Το γεγονός ότι το φως είναι ήδη σε μια ίνα, του επιτρέπει να παραδοθεί εύκολα σε ένα κινητό στοιχείο εστίασης. Αυτό είναι σημαντικό για την κοπή με λέιζερ, συγκόλληση και την αναδίπλωση μετάλλων και πολυμερών.
- Υψηλή ισχύς εξόδου: Τα λέιζερ ινών μπορεί να έχουν ενεργές περιοχές μήκους πολλών χιλιομέτρων και έτσι μπορούν να παρέχουν πολύ υψηλό οπτικό κέρδος. Μπορούν να υποστηρίξουν επίπεδα κιλοβάτ συνεχούς ισχύος εξόδου, λόγω του υψηλού λόγου του εμβαδού επιφάνειας της ίνας ως προς τον όγκο της, το οποίο επιτρέπει την αποτελεσματική ψύξη.
- Υψηλή οπτική ποιότητα: Οι ιδιότητες κυματοδήγησης της ίνας μειώνουν ή εξαλείφουν τη θερμική παραμόρφωση της οπτικής διαδρομής, παράγοντας μια οπτική ακτίνα υψηλής ποιότητας, περιορισμένης περίθλασης.
- Συμπαγές μέγεθος: Το μέγεθος τους είναι μικρό σε σχέση με τη ράβδο ή τα λέιζερ αερίου για παράδειγμα συγκρίσιμης ισχύος, επειδή η ίνα μπορεί να κάμπτεται και να περιελίσσεται, με συνέπεια την εξοικονόμηση χώρου.
- Αξιοπιστία: Παρουσιάζουν υψηλή σταθερότητα σε δονήσεις και εκτεταμένη διάρκεια ζωής.
- Η υψηλή μέγιστη ισχύς και οι παλμοί nanosecond επιτρέπουν την αποτελεσματική χάραξη.
- Η πρόσθετη δύναμη και η καλύτερη ποιότητα της δέσμης παρέχει πιο καθαρή κοπή άκρων και κοπή υψηλότερης ταχύτητας.

4.2.1 Βασικά χαρακτηριστικά

Όπως αναφέρθηκε, το στάδιο ενίσχυσης του laser YLIA M20 είναι φτιαγμένο από ίνες διπλής επίστρωσης. Πολλά λέιζερ ινών υψηλής ενέργειας βασίζονται σε ίνες

διπλής επίστρωσης. Το ενεργό μέσο αποτελεί τον πυρήνα της ίνας, ο οποίος περιβάλλεται από δύο επίπεδα επίστρωσης. Η λειτουργία του λέιζερ διαδίδεται στον πυρήνα, ενώ μια δέσμη άντλησης διαδίδεται στο εσωτερικό στρώμα επένδυσης. Η εσωτερική επένδυση έχει υψηλότερο δείκτη διάθλασης από την εξωτερική. Αυτό επιτρέπει στην εσωτερική επένδυση να καθοδηγεί το φως μέσω της ολικής εσωτερικής ανάκλασης κατά τον ίδιο τρόπο που το κάνει και ο πυρήνας, αλλά για ένα διαφορετικό φάσμα μηκών κύματος.

Η εξωτερική επένδυση κρατά αυτό το φως άντλησης περιορισμένο. Η διάταξη αυτή επιτρέπει στον πυρήνα να αντληθεί με μια ακτίνα πολύ μεγαλύτερης ισχύος και επιτρέπει την μετατροπή του φωτός άντλησης, χαμηλής σχετικά φωτεινότητας, σε ένα σήμα πολύ υψηλότερης φωτεινότητας. Ως αποτέλεσμα, τα λέιζερ και οι ενισχυτές ινών αναφέρονται κάποιες φορές ως "μετατροπείς φωτεινότητας".

Το λέιζερ YLIA M20 είναι παλμικό, που σημαίνει ότι η οπτική ισχύς εμφανίζεται σε παλμούς κάποιας διάρκειας και κάποιου ρυθμού επανάληψης. Στα παλμικά laser η ενέργεια προσφέρεται με μορφή παλμών ώστε η ισχύς στην έξοδο να είναι μεγαλύτερη. Κάθε παλμός laser στην έξοδο διαρκεί περίπου 1ms (millisecond), αλλά αποτελείται από εκατοντάδες μικρότερους παλμούς-σπίθες που διαρκούν περίπου 1 μs (microsecond) και διαφέρουν μεταξύ τους και στη διάρκεια και στην ισχύ.

Ο τρόπος λειτουργίας του YLIA M20, οδηγεί σε παλμούς laser με διάρκεια περίπου ίση με 100ns. Ο ρυθμός επανάληψης στο εύρος λειτουργίας του laser κυμαίνεται από 20 έως 100kHz. Ενδεικτικά, για ρυθμό επανάληψης 20kHz η ενέργεια ανά παλμό είναι 1mJ.

Τέλος, η δέσμη εξόδου του, ευθυγραμμίζεται με μια διάμετρο μικρότερη του 1mm.

4.2.2 Κανόνες ασφαλείας κατά τη χρήση του laser

Η ακτινοβολία του laser YLIA M20 έχει αρκετή οπτική ισχύ ικανή να αποτελέσει κίνδυνο, είτε λόγω άμεσης έκθεσης, είτε έκθεσης σε ανακλάσεις. Μερικοί, αλλά όχι όλοι, πιθανοί κίνδυνοι για τον άνθρωπο περιλαμβάνουν μόνιμη απώλεια όρασης και/ή βλάβη κάτω από την επιφάνεια του δέρματος. Επιπροσθέτως, η ακτίνα είναι ευθυγραμμισμένη, με αποτέλεσμα οι κίνδυνοι αυτοί να αφορούν και μεγάλες αποστάσεις από την πηγή.

Για τους παραπάνω λόγους, το περίβλημα της μηχανής είναι κλειστό έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η πιθανότητα έκθεσης στην ακτινοβολία, ενώ είναι μαύρου χρώματος έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι ανακλάσεις.

Είναι όμως απαραίτητο κατά τη λειτουργία του laser, να μην αφαιρείται σε καμία περίπτωση κανένα τμήμα του περιβλήματος της μηχανής, ενώ όσοι βρίσκονται στην χώρα να φορούν γυαλιά προστασίας τα οποία υπάρχουν στο εργαστήριο. Επίσης,

πρέπει οι χειριστές να διαβάσουν με προσοχή όλους τους κανόνες ασφαλείας οι οποίοι αναφέρονται με λεπτομέρεια στο εγχειρίδιο του laser πριν κάνουν χρήση της μηχανής.

4.2.2.1 Γυαλιά προστασίας και προστατευτικό τζάμι

Στο εργαστήριο υπάρχουν 2 ζεύγη γυαλιών προστασίας: Ένα Frame F20 Filter P1C02 (εικόνα 4.1) και ένα Frame F18 Filter P1C02 (εικόνα 4.2). Η επιλογή των γυαλιών αυτών έγινε βάσει των χαρακτηριστικών του laser που χρησιμοποιούμε. Έτσι, και τα δύο ζεύγη χρησιμοποιούν το φίλτρο P1C02 με μετάδοση ορατού φωτός (visible light transmission) σχεδόν 60-65 % και χρώματος Light-green. Το εύρος μήκους κύματος που καλύπτουν είναι $810 - < 940$, $940 - < 980$, $980-1064\text{nm}$, που σημαίνει ότι φιλτράρουν στο μήκος κύματος που μας ενδιαφέρει.



Εικόνα 4.1: Frame F20 Filter P1C02



Εικόνα 4.2: Frame F18 Filter P1C02

Επίσης, στη μία πλευρά της μηχανής υπάρχει το προστατευτικό τζάμι P1K03, διαστάσεων 297x210mm και πάχους περίπου 3mm. Η μετάδοση ορατού φωτός είναι περίπου 24% και είναι πράσινου χρώματος.

Η προστασία που παρέχει σε διάφορα μήκη κύματος φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

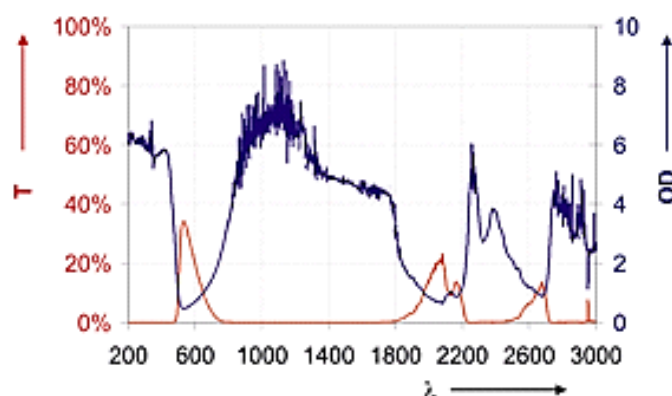
Παρατηρούμε ότι στην περιοχή που μας ενδιαφέρει (1064nm) παρέχουν το μεγαλύτερο βαθμό προστασίας (οπτική πυκνότητα- OD), 6+.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η καμπύλη μετάδοσης από την οποία προκύπτει και ο παραπάνω πίνακας:

Τέλος υπάρχει μια πλάκα φωσφόρου για δοκιμές.

Μήκος κύματος	Οπτική πυκνότητα	Επίπεδο προστασίας
808 - < 830	3+	DIR LB3
830 - < 940	4+	DIR LB4
940 - < 1150	6+	DIR LB6
1150 - 1400	5+	DIR LB5
>1400 - 1650	4+	DIR LB4

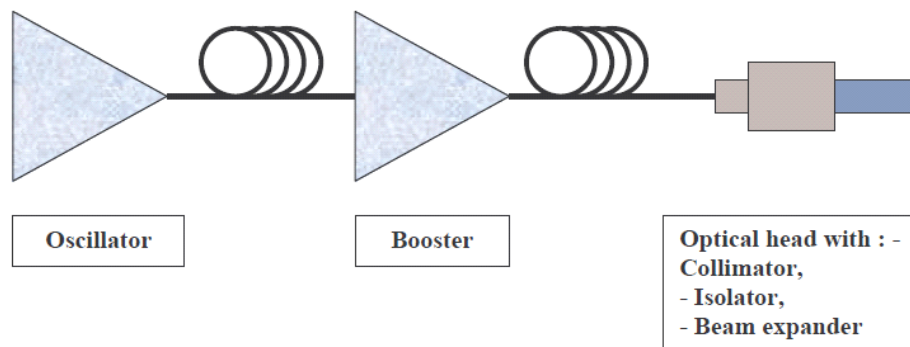
Πίνακας 4.1: Προστασία P1K03



Σχήμα 4.5: Καμπύλη μετάδοσης

4.2.3 Οπτική λειτουργία [18]

Η οπτική λειτουργία δίνεται παρακάτω:



Σχήμα 4.6: Οπτική λειτουργία Laser

Όπως φαίνεται στο σχήμα, το YLIA M20 είναι ένας παλμικός ταλαντωτής με ένα τελικό στάδιο ενίσχυσης. Η ακτίνα εξόδου είναι κατευθυντική, με διάμετρο $< 1\text{mm}$. Το laser περιλαμβάνει επίσης μια προαιρετική κόκκινη ακτίνα στόχευσης.

Η οπτική κεφαλή περιλαμβάνει έναν κατευθυντήρα, έναν απομονωτή και έναν διαστολέα δέσμης.

4.2.4 Ηλεκτρονική λειτουργία [18]

Με σκοπό το μέγιστο επίπεδο ολοκλήρωσης, χρησιμοποιούνται ενσωματωμένα ηλεκτρονικά.

Ο σκοπός των ενσωματωμένων ηλεκτρονικών είναι να:

- Δημιουργούν παλμούς.
- Ρυθμίζουν τη θερμοκρασία των διατάξεων διόδων.
- Οδηγούν το ρεύμα της διάταξης άντλησης.
- Ελέγχουν τα στάδια ενίσχυσης στη λειτουργία Αυτομάτου Ελέγχου Ρεύματος (ACC).

- Διαχειρίζονται εσωτερικές παραμέτρους και συνδέσεις, με στόχο την προστασία της συσκευής και του χειριστή. Έτσι, οι υψηλές και χαμηλές οριακές τιμές των κριτικών παραμέτρων και τα κατώφλια ασφαλείας ελέγχονται από τα ενσωματωμένα ηλεκτρονικά.
- Παρέχουν μια διεπαφή επικοινωνίας USB για απομακρυσμένο έλεγχο και παρακολούθηση.
- Παρέχουν μια TTL είσοδο για τη διαχείριση εφαρμογών σήμανσης, με τη βοήθεια μικροελεγκτή.

4.2.5 Τα μέρη του laser [18]

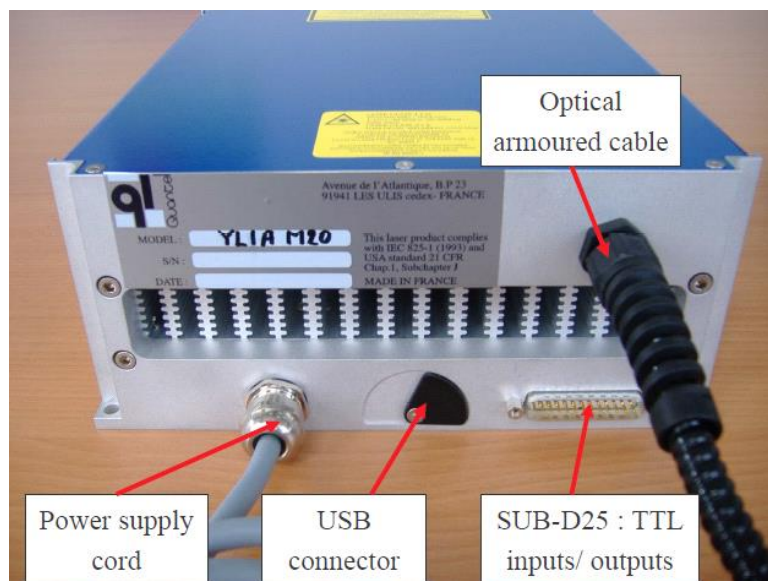
Τα μέρη του laser φαίνονται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 4.3: Τα μέρη του YLIA M20

Διακρίνονται τα εξής:

- Η μονάδα του laser
 - Η κεφαλή του laser
 - Θωρακισμένη ίνα
- **Μονάδα του laser:** Το εμπρός τμήμα της μονάδας laser φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 4.4: Εμπρός τμήμα μονάδας laser

Διακρίνεται το καλώδιο της τροφοδοσίας το οποίο προστατεύεται από ένα πλαστικό κάλυμμα. Αποτελείται από 3 καλώδια και μία θωράκιση. Η παροχή ηλεκτρικής ισχύος μπορεί να μεταφέρει έως και 250W. Είναι ιδιαίτερα ορισμένη, έτσι ώστε να ταιριάζει την ισχύ του δικτύου με την τάση και το ρεύμα λειτουργίας του YLIA M20. Βλέπουμε επίσης τη σύνδεση USB αλλά και τις 25 TTL εισόδους/εξόδους της μονάδας του laser. Οι συνδέσεις που έγιναν στα πλαίσια της διατριβής περιγράφονται παρακάτω. Τέλος, η πίσω πλευρά της μονάδας του laser, φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 4.5: Πίσω τμήμα μονάδας laser

- Η κεφαλή του laser [13], [17], [18]

Η κεφαλή του laser YLIA M20 περιλαμβάνει, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, έναν κατευθυντήρα, έναν απομονωτή και έναν διαστολέα δέσμης.

Το εξωτερικό τμήμα της κεφαλής φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 4.6: Κεφαλή laser YLIA M20

Η περιοχή της κυκλικής κηλίδας του λέιζερ δίνεται από τη σχέση:

$$A = \pi w^2, \quad (4.13)$$

όπου w η ακτίνα της κηλίδας.

Στην περίπτωση μας, η διάμετρος της ευθυγραμμισμένης ακτίνας εξόδου είναι 600μm ή 0.6mm σύμφωνα με τις προδιαγραφές του laser, κατά συνέπεια $w = 0.3\text{mm}$.

Επίσης, σύμφωνα με τις τεχνικές προδιαγραφές, η δέσμη αποκλίνει κατά 1mrad ή 0.06°.

Σύμφωνα με τη θεωρία Gauss, η ακτίνα της κηλίδας αυξάνεται γραμμικά με την απόσταση, ύστερα από την περιοχή Rayleigh. Εντός της περιοχής Rayleigh, το μέγεθος της κηλίδας συνεχίζει να αυξάνεται, αλλά μη γραμμικά. Η περιοχή Rayleigh δίνεται από:

$$z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}, \quad (4.14)$$

όπου w_0 είναι η ακτίνα της δέσμης στο στενότερο σημείο της ακτίνας και λ είναι το μήκος κύματος της ακτινοβολίας.

Στην περίπτωση μας η ακτίνα είναι 0.3mm και το μήκος κύματος 1064nm. Αυτό δίνει μια περιοχή Rayleigh:

$$z_R = 0.886m$$

Έτσι, πριν από τα 0.886 μέτρα, είμαστε στην περίπτωση όπου η ακτίνα της δέσμης με την απόσταση, απλά δεν μεταβάλλεται ακριβώς γραμμικά.

Η ακτίνα της δέσμης σε μια απόσταση z από το σημείο στενότερης δέσμης (έξοδος του laser) είναι:

$$w(z) = w_0 \quad (4.15)$$

Στην περίπτωση μας $z_R = 0.886$. Έτσι, η παραπάνω σχέση γίνεται:

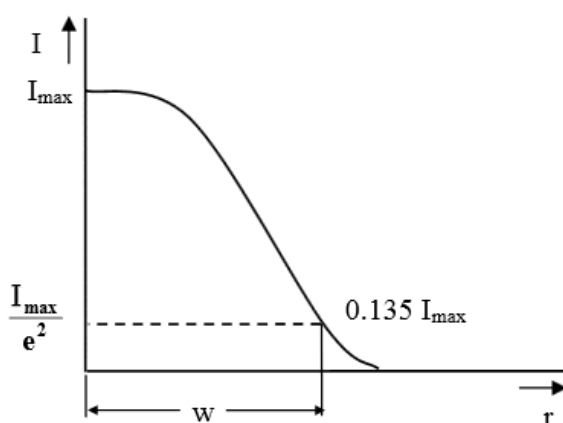
$$w(z) = w_0$$

Από την παραπάνω σχέση φαίνεται ότι η ελάχιστη τιμή του $w(z)$ εμφανίζεται σε $w(0) = w_0$, εξ ορισμού. Σε απόσταση 0.886m από την έξοδο του laser, η ακτίνα της δέσμης αυξάνεται κατά ένα παράγοντα .

Σημειώνεται ότι όταν συζητάμε για ακτίνα δέσμης π.χ. $w = 0.5mm$, εννοούμε ότι στο άκρο της δέσμης, δηλαδή στα 0.5mm η ένταση της ακτίνας είναι ίση με το I_{MAX} ή $0.135I_{MAX}$, δηλαδή με το 13.5% της μέγιστης έντασης στο κέντρο της (Gauss). Η πλήρης δέσμη εκτείνεται πέρα από την ακτίνα των 0.5mm, όμως το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας της δέσμης είναι μέσα στην ακτίνα αυτή.

Σημειώνεται ότι περίπου το 94% της ενέργειας της δέσμης είναι συγκεντρωμένο εντός της περιοχής που ορίζει η ακτίνα w .

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η κατανομή της έντασης της ακτινοβολίας που παρουσιάζει μια τομή της δέσμης του laser.



Σχήμα 4.7: Κατανομή ακτινοβολίας laser

4.2.6 Τρόποι λειτουργίας [18]

Το laser μπορεί να λειτουργήσει με τρεις διαφορετικούς τρόπους:

- Εξωτερική λειτουργία: Το laser ελέγχεται μόνο από τα σήματα του SUB-D25.

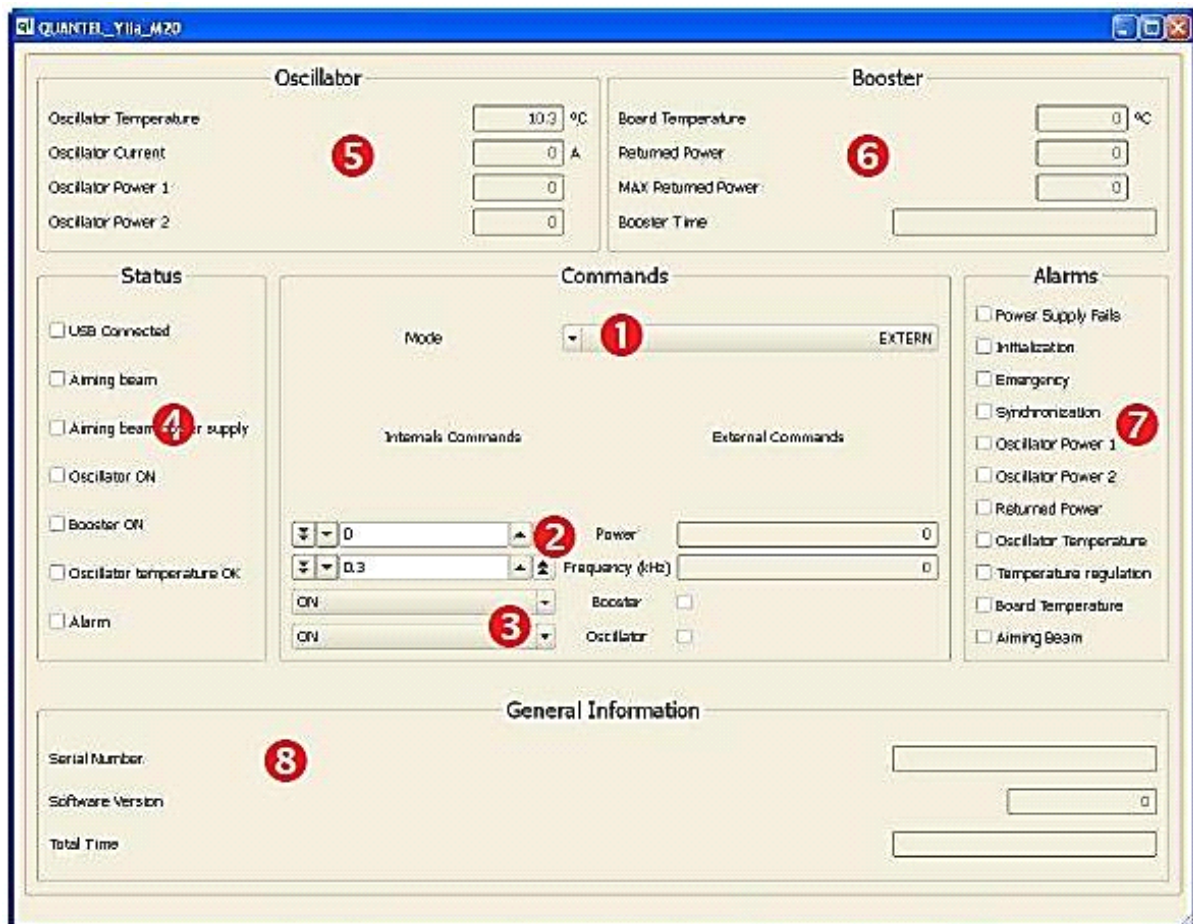
Σημείωση: Το SUB-D25 είναι μια διεπαφή η οποία περιλαμβάνει 25 pins για τον πλήρη έλεγχο του laser και φαίνεται στο δεξί μέρος της εικόνας 4.4 του κεφαλαίου αυτού.

- Εσωτερική λειτουργία: Το laser ελέγχεται μόνο από το USB και από τη διεπαφή του λογισμικού. Για λόγους ασφαλείας, απαιτείται μόνο το “Emergency stop”, στην είσοδο του SUB-D25.
- Λειτουργία επίδειξης: Το laser ελέγχεται μόνο από τη διεπαφή USB, εκτός από το σήμα διαμόρφωσης booster και το “Emergency stop”, που παρέχονται από το SUB-D25.

4.4 Εξωτερική λειτουργία - Παρουσίαση λογισμικού ελέγχου USB [18]

Επιλέχθηκε η **εξωτερική λειτουργία** του laser σε συνδυασμό με το λογισμικό ελέγχου, προς έλεγχο των ηλεκτρικών σημάτων στο SUB-D25 (σήμα ενεργοποίησης, σήμα συγχρονισμού, ρυθμίσεις ισχύος) αλλά και για μία επισκόπηση της κατάστασης του laser.

Ο χρήστης, ανοίγοντας την εφαρμογή ΥΛΙΑ M20 1.7, βλέπει το παράθυρο που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, στην οποία έχουν επισημανθεί οι βασικές περιοχές του:



Σχήμα 4.8: Διεπαφή λογισμικού YLIA M20 1.7

1. Mode επιλογής λειτουργίας: Το mode της επιλογής λειτουργίας παρέχει τρεις τρόπους λειτουργίας:

- Εξωτερική λειτουργία (προεπιλογή): Το laser ελέγχεται μόνο από τα σήματα του SUB-D25.
- Εσωτερική λειτουργία: Το laser ελέγχεται μόνο από το USB και από τη διεπαφή του λογισμικού. Για λόγους ασφαλείας, απαιτείται μόνο το “Emergency stop”, στην είσοδο του SUB-D25.
- Λειτουργία επίδειξης: Το laser ελέγχεται μόνο από τη διεπαφή USB, εκτός από το σήμα διαμόρφωσης booster και το “Emergency stop”, που παρέχονται από το SUB-D25.

2. Ρυθμίσεις και ανάγνωση της ισχύος εξόδου και του ρυθμού επανάληψης:

- Οι ρυθμίσεις της ισχύος εξόδου και του ρυθμού επανάληψης πρέπει να τεθούν στο αριστερό τμήμα αυτού του παραθύρου. Το μέγιστο επίπεδο

ισχύος εξόδου είναι 255, που αντιστοιχεί στην ονομαστική ισχύ εξόδου. Η ρύθμιση αυτή καθώς και η ρύθμιση του ρυθμού επανάληψης είναι διαθέσιμα μόνο στην εσωτερική λειτουργία και στη λειτουργία επίδειξης.

- Η ανάγνωση της ισχύος εξόδου και του ρυθμού επανάληψης φαίνονται στο δεξί μέρος του παραθύρου. Η ανάγνωση αυτή είναι διαθέσιμη μόνο στον εξωτερικό τρόπο λειτουργίας. Αναπαριστούν την τιμή που έχει τεθεί στο SUB-25.

Σημείωση: Αν το laser τεθεί στον εσωτερικό τρόπο λειτουργίας, τα ηλεκτρικά σήματα στο SUB-D25 διαβάζονται από το λογισμικό αλλά δεν ελέγχουν τη μονάδα. Το δεξί μέρος του παραθύρου δε δείχνει την κατάσταση του laser αλλά μόνο την κατάσταση των ηλεκτρικών σημάτων.

3. Ρυθμίσεις και ανάγνωση του ταλαντωτή και του booster

- Η ενεργοποίηση του ταλαντωτή και του booster μπορεί να τεθεί στο αριστερό μέρος του παραθύρου αυτού στον εσωτερικό τρόπο λειτουργίας. Στη λειτουργία επίδειξης μπορεί να τεθεί μόνο η ενεργοποίηση του ταλαντωτή. Στην εξωτερική λειτουργία η ενεργοποίηση του ταλαντωτή/booster είναι εφικτή μόνο από το SUB-D25.

Σημείωση: Το ON σημαίνει ότι απαιτείται η ενεργοποίηση του ταλαντωτή/booster.

- Η κατάσταση των σημάτων ηλεκτρικής ενεργοποίησης του ταλαντωτή και του booster που συνδέονται στο SUB-D25 είναι ορατή στο δεξί μέρος του παραθύρου αυτού. Οι αναγνώσεις αυτές είναι διαθέσιμες μόνο στον εξωτερικό τρόπο λειτουργίας και στη λειτουργία επίδειξης μόνο για το booster.

Σημείωση: Αν το laser έχει τεθεί στον εσωτερικό τρόπο λειτουργίας, τότε τα ηλεκτρικά σήματα στο SUB-D25 διαβάζονται από το λογισμικό αλλά δεν ελέγχουν τη μονάδα. Το δεξί μέρος του παραθύρου δε δείχνει την κατάσταση του laser αλλά μόνο την κατάσταση των ηλεκτρικών σημάτων (για παράδειγμα, τα σήματα ενεργοποίησης του ταλαντωτή και του booster μπορεί να είναι ON ενώ το laser είναι ακόμη OFF εξαιτίας κάποιου alarm).

4. Πλαίσια κατάστασης (checkboxes)

Τα πλαίσια κατάστασης δείχνουν την κατάσταση του laser. Η σημασία του κάθε checkbox δίνεται παρακάτω:

- “USB connected”: Αν το checkbox είναι ενεργοποιημένο σημαίνει ότι η USB επικοινωνία μεταξύ του υπολογιστή και του laser λειτουργεί.
- “Aiming beam”: Αν είναι ενεργοποιημένο σημαίνει ότι η ακτίνα στόχευσης είναι ενεργοποιημένη.
- “Aiming beam power supply”: Η ενεργοποίηση του σημαίνει ότι τα 5V τροφοδοσίας της κόκκινης ακτίνας στόχευσης που απαιτούνται είναι σε συμφωνία με τις προδιαγραφές.

Σημείωση: Αν η τροφοδοσία της κόκκινης ακτίνας στόχευσης δεν είναι ενεργοποιημένη, δεν ενεργοποιείται η κόκκινη ακτίνα και παρουσιάζεται alarm.

- “Oscillator ON”: Όταν είναι ενεργοποιημένο σημαίνει ότι ο ταλαντωτής είναι ενεργοποιημένος και δεν έχει εμφανιστεί κανένα alarm. Το laser εκπέμπει μία “low” οπτική ισχύ εξόδου μέσω της οπτικής κεφαλής του laser.
- “Booster ON”: Όταν είναι ενεργοποιημένο σημαίνει ότι και ο ταλαντωτής και το booster είναι ενεργοποιημένα και δεν εμφανίζεται κανένα alarm. Το laser μπορεί να εκπέμπει μία “high” οπτική ισχύ εξόδου μέσω της οπτικής κεφαλής του laser. Η οπτική ισχύς εξόδου εξαρτάται από τις ρυθμίσεις της ισχύος εξόδου του laser.
- “ECL Temperature OK”: Όταν είναι ενεργοποιημένο σημαίνει ότι η θερμοκρασία της διόδου του ταλαντωτή είναι μέσα στο επιθυμητό εύρος λειτουργίας.
- “Alarm”: Όταν το checkbox είναι ενεργοποιημένο σημαίνει ότι συμβαίνουν ένα ή περισσότερα alarm. Το laser σταματάει αυτόματα.

5. Το παράθυρο του ταλαντωτή:

Το παράθυρο του ταλαντωτή δίνει την κατάσταση χειρισμού του ταλαντωτή.

- Το “ Oscillator temperature” δίνει τη θερμοκρασία του ταλαντωτή. Η θερμοκρασία αυτή ρυθμίζεται από ένα TEC.
- Το “Oscillator current” δίνει το ρεύμα λειτουργίας των σταδίων ενίσχυσης.
- Το “Oscillator power 1” δίνει μια σχετική τιμή της ισχύος του laser.
- Το “Oscillator power 2” δίνει την ισχύ εξόδου του ταλαντωτή.

6. Το παράθυρο του booster:

Το παράθυρο του booster δίνει την κατάσταση χειρισμού του booster.

- Το “Board temperature” δίνει την εσωτερική θερμοκρασία του laser.

- Το “Returned power” δίνει μια σχετική τιμή της οπτικής ισχύος που επιστρέφει από το laser.
- Το “Max returned power” δίνει τη μέγιστη καταγεγραμμένη τιμή της οπτικής ισχύος που επιστρέφεται από το laser.
- Το “Booster time” δίνει τη συνολική διάρκεια λειτουργίας του booster από την πρώτη εγκατάσταση.

7. Παράθυρο alarms:

Το παράθυρο alarm δίνει την κατάσταση των alarm του laser. Τα alarm ενεργοποιούνται όταν επικυρώνονται τα checkboxes.

- Το “Power supply fails” δείχνει εάν μία ή περισσότερες εσωτερικές ή/και εξωτερικές τροφοδοσίες είναι εκτός εύρους.
- Το “ Initialization” δείχνει αν το laser είναι ακόμη στην περίοδο προθέρμανσης. Αυτό το alarm συμβαίνει για μερικά δευτερόλεπτα ύστερα από την ενεργοποίηση της γενικής τροφοδοσίας.
- Το “Emergency” δείχνει εάν το ηλεκτρικό σήμα του emergency stop είναι στην κανονική κατάσταση ή σε κατάσταση έκτακτης ανάγκης.
- Το “Synchronization” δείχνει αν το σήμα συγχρονισμού δεν είναι σε συμφωνία με τις προδιαγραφές. Το alarm αυτό μπορεί να εμφανιστεί μόνο στην εξωτερική λειτουργία.
- Το “ Oscillator power 1” δείχνει αν η οπτική ισχύς του ταλαντωτή είναι κάτω από ένα κατώφλι που έχει τεθεί εργοστασιακά.
- Το “ Oscillator power 2” δείχνει αν η οπτική ισχύς εξόδου του ταλαντωτή είναι κάτω από ένα κατώφλι που έχει τεθεί εργοστασιακά.
- Το “Returned beam” δείχνει αν η επιστρεφόμενη ισχύς στο laser είναι πέρα από κάποιο κατώφλι που έχει τεθεί εργοστασιακά.
- Το “Oscillator temperature” δείχνει αν η θερμοκρασία του ταλαντωτή είναι εκτός του εύρους $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ από τη θερμοκρασία ταλαντωτή που έχει τεθεί εργοστασιακά.
- Το “Temperature regulation” δείχνει αν η θερμοκρασία του ταλαντωτή ήταν εκτός του εύρους $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ για πάνω από 20sec.
- Το “Board temperature” δείχνει ότι η εσωτερική θερμοκρασία του laser είναι εκτός του εύρους 5°C και 53°C του θερμοκρασιακού εύρους κανονικής εσωτερικής λειτουργίας.
- Το “Aiming beam” δείχνει αν το σήμα ενεργοποίησης της στόχευσης είναι ενεργοποιημένο ενώ η τροφοδοσία των 5V δεν είναι ενεργοποιημένη ή είναι εκτός των απαιτήσεων τάσης και ρεύματος.

8. Παράθυρο γενικών πληροφοριών

Το παράθυρο γενικών πληροφοριών δίνει τις γενικές πληροφορίες που αφορούν τη μονάδα του laser.

- Το “Serial number” αποτελείται από διάφορους ASCII χαρακτήρες που αναπαριστούν το σειριακό αριθμό του laser.
- Το “Software version” δίνει την έκδοση του λογισμικού του laser. Είναι στη μορφή νΧ.ΥΥ όπου το Χ ορίζει κάποια σημαντική τροποποίηση ενώ το .ΥΥ κάποια μικρή τροποποίηση.
- Το “Total time” δείχνει το συνολικό χρόνο χειρισμού. Ο μετρητής αυξάνεται όταν ενεργοποιούνται τα +24V της τροφοδοσίας.

4.3 Υλοποίηση

4.3.1 Ρυθμός επανάληψης

Η μέση ισχύς του laser ισούται με το γινόμενο της ενέργειας ανά παλμό επί το ρυθμό επανάληψης των παλμών. Έτσι, η μέγιστη ισχύς του laser προκύπτει ότι είναι 20W.

Μεταβάλλοντας το ρυθμό επανάληψης, μεταβάλλουμε την ενέργεια ανά παλμό αλλά και τη συνολική ισχύ του laser. Ο ρυθμός επανάληψης καθορίζεται από το pin 20 της μονάδας του laser στο οποίο δίνουμε τετραγωνικούς παλμούς μέσω του Arduino.

Το βασικό χαρακτηριστικό που πρέπει να έχει ο τετραγωνικός παλμός είναι ότι η συχνότητα του πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 20kHz. Επίσης, πρέπει ο παλμός να έχει ελάχιστο μήκος 100nsec. Τέλος, από τις προδιαγραφές του laser δεν υπάρχει περιορισμός ως προς το duty cycle του παλμού.

Για τον τετραγωνικό παλμό χρησιμοποιήσαμε το **pin 9 του Arduino**. Το pin αυτό συνδέεται με έναν μετρητή, τον timer1 ο οποίος έχει βασική συχνότητα 31372.55Hz. Τη συχνότητα αυτή μπορούμε να τη διαιρέσουμε με τις τιμές 1, 8, 64, 256, και 1024.

Δίνοντας την εντολή `TCCR1B = TCCR1B & 0b11111000 | <setting>` ; και θέτοντας στο setting την τιμή 0x01, διαιρούμε τα 31372.55 Hz με τη μονάδα, αφήνοντας τη **συχνότητα** ως έχει, δηλαδή στα **31372.55Hz**. Κατά συνέπεια, η **περίοδος** των παλμών είναι $1/31372.55 = 31.87\mu\text{sec}$.

Επίσης, μέσω της εντολής στο Arduino: `analogWrite(OutPin, 127)`; ορίσαμε το duty cycle του παλμού στα $\cdot 100\% = 0.498 \cdot 100\% = 49.8\%$. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι **το μήκος των παλμών** είναι $0.498 \cdot 31.87\mu\text{sec} = 15.87\mu\text{s}$.

Με την παραπάνω τιμή ικανοποιείται η απαίτηση παλμών διάρκειας τουλάχιστον 100nsec.

Ακολουθεί ο κώδικας του για την παραγωγή του παλμού από το Arduino:

```
define OutPin 9;

void setup()
{
  pinMode(OutPin,OUTPUT);
  TCCR1B = TCCR1B & 0b11111000 | 0x01;
}

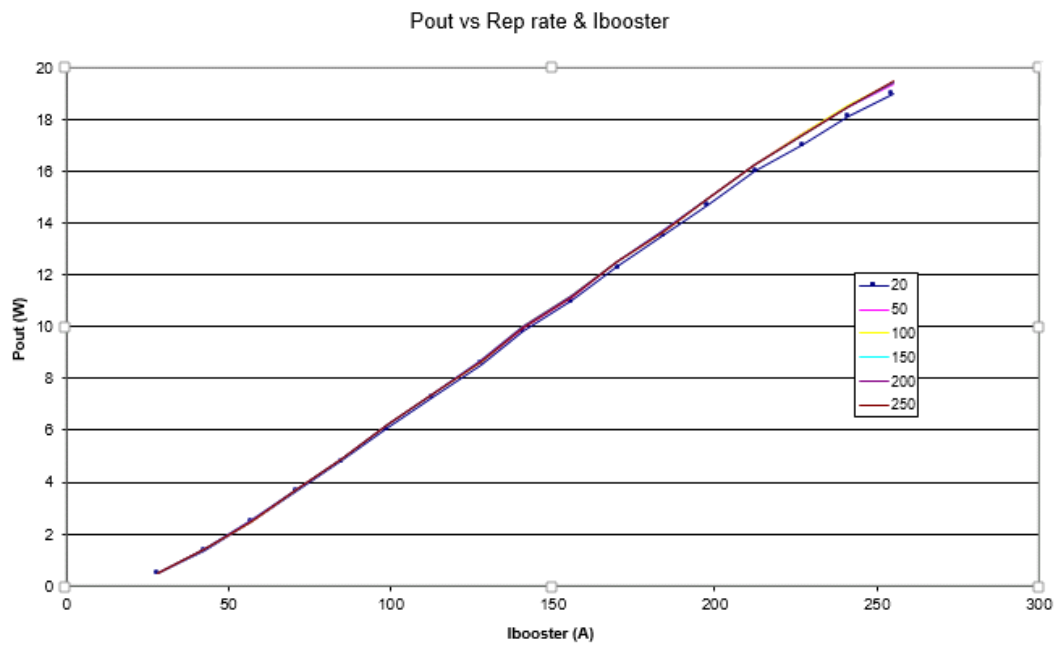
void loop()
{
  analogWrite(OutPin, 127);
}
```

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι τιμές ισχύος εξόδου του laser σε συνάρτηση της ισχύος που του δίνουμε (28 έως 255), για διάφορες συχνότητες (ρυθμό επανάληψης, pulse repetition rate ή PRR):

PRR (kHz)	20	50	100	150	200	250
I(A)	Pout(W)	Pout(W)	Pout(W)	Pout(W)	Pout(W)	Pout(W)
28	0,489	0,488	0,506	0,51	0,512	0,507
42,5	1,37	1,39	1,41	1,41	1,41	1,42
57	2,46	2,5	2,51	2,52	2,52	2,5
71	3,66	3,71	3,72	3,74	3,74	3,71
85	4,83	4,92	4,94	4,94	4,94	4,91
99	6,08	6,2	6,21	6,21	6,22	6,19
113	7,27	7,42	7,43	7,43	7,43	7,39
128	8,55	8,66	8,67	8,7	8,68	8,65
141	9,82	9,97	9,99	9,99	9,99	9,93
156	11	11,17	11,19	11,2	11,19	11,17
170	12,3	12,49	12,48	12,49	12,49	12,48
184	13,5	13,64	13,66	13,68	13,67	13,66
198	14,7	14,93	14,93	14,92	14,92	14,91
212,5	16	16,22	16,23	16,22	16,22	16,22
227	17	17,4	17,43	17,39	17,38	17,37
241	18,1	18,52	18,53	18,52	18,5	18,52
255	19	19,39	19,44	19,44	19,43	19,47

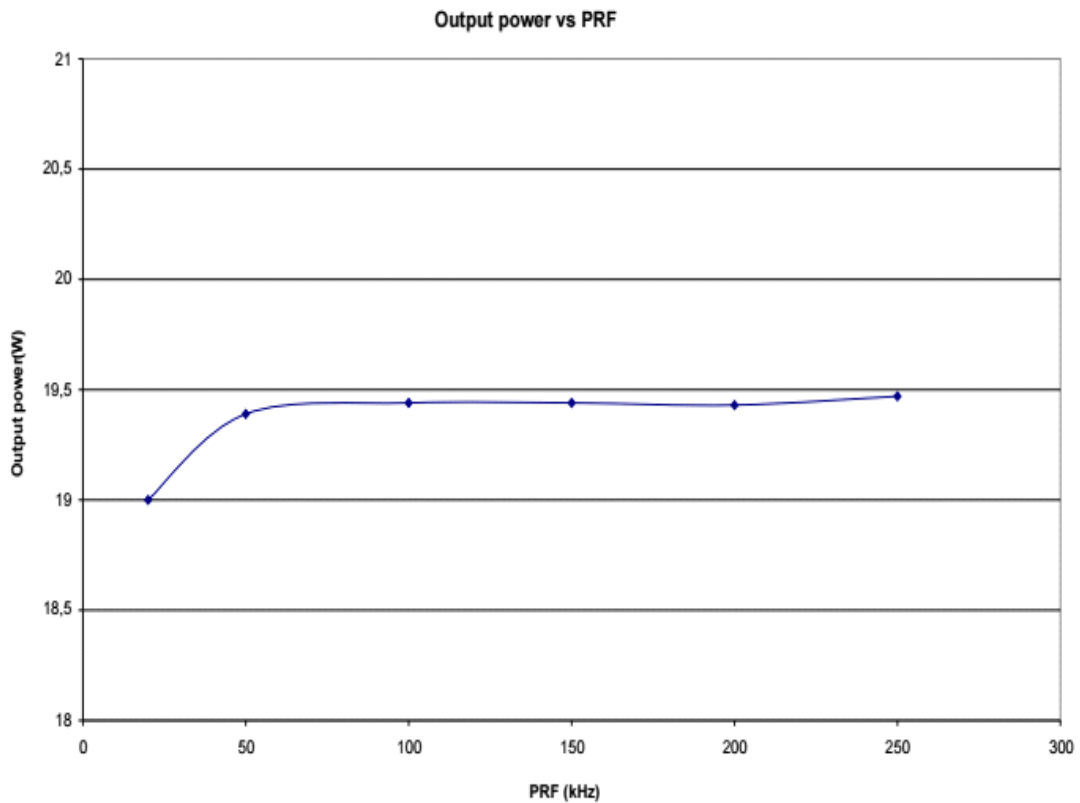
Πίνακας 4.2: Ισχύς εξόδου (Pout) συναρτήσει repetition rate και ισχύος εισόδου I(A)

Με βάση τις παραπάνω τιμές προκύπτουν οι ακόλουθες καμπύλες, οι οποίες δείχνουν ότι δεν υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις στην ισχύ εξόδου του laser όταν μεταβάλλουμε το repetition rate.



Σχήμα 4.9: P_{out} vs Rep rate & $I_{booster}$

Αν ενεργοποιήσουμε όλα τα pin 1 έως 8, τότε ανάλογα με το repetition rate, η ισχύς του laser φαίνεται παρακάτω:



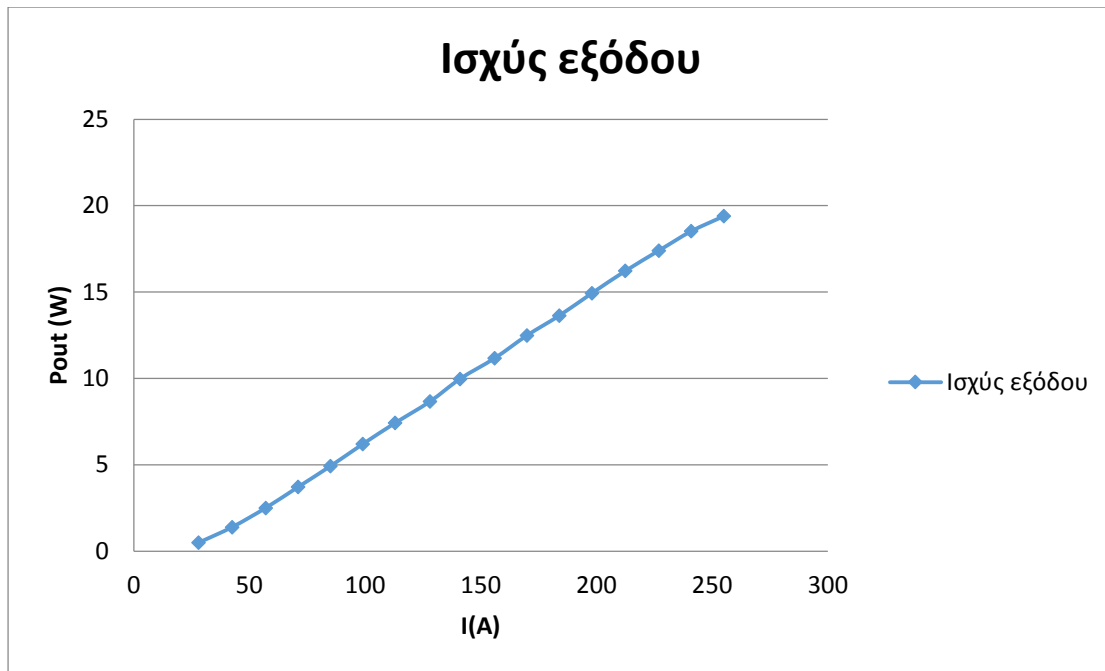
Σχήμα 4.10: Output power vs PRR

Σημείωση: Το PRR και το PRF αναφέρονται στην ίδια ποσότητα, δηλαδή στο ρυθμό επανάληψης παλμού (pulse repetition rate).

Παρατηρούμε ότι η ισχύς του laser κυμαίνεται από 19W έως περίπου 19.4W, στην περιοχή συχνοτήτων που αντιστοιχεί στο εύρος λειτουργίας, δηλαδή από 20kHz έως 100kHz.

Με βάση τον πίνακα 4.2, για $PRR = 31372.55 \text{ Hz}$, η μέγιστη ισχύς εξόδου του laser είναι μεταξύ **19** και **19.4W**. Αυτό σημαίνει πως (υποθέτοντας μια ενδιάμεση τιμή ισχύος 19.2W) η ενέργεια κάθε παλμού εξόδου είναι $19.2/31372.55 = \mathbf{0.612mJ}$, δηλαδή μικρότερη από το 1mJ που αντιστοιχεί σε $PRR = 20\text{kHz}$.

Τέλος, για συγκεκριμένη συχνότητα, στα 50kHz, η καμπύλη της ισχύος εξόδου σε συνάρτηση με το $I(A)$ pin 1 έως 8, φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 4.11: P_{out} vs I(A)

Με βάση τον διαθέσιμο εξοπλισμό, χρησιμοποιήθηκε ο μικροελεγκτής Arduino για την παραγωγή του παλμού καθορισμού του PRR. Ειδικότερα, χρησιμοποιήθηκε το pin 9 του Arduino και όχι κάποιο άλλο pin γιατί όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 2, εάν, λ.χ. αλλάξουμε το TCCR0B, επηρεάζονται οι συναρτήσεις millis() και η delay() με αποτέλεσμα να μετράνε το χρόνο πιο γρήγορα ή πιο αργά από το κανονικό. Αυτό έχει σα συνέπεια να επηρεάζεται η ταχύτητα των κινητήρων, οπότε στα πλαίσια της διατριβής προτιμήθηκε η αλλαγή του TCCR1B.

Βέβαια, δεν υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία όσον αφορά την ισχύ εξόδου από την Quantel για τη συγκεκριμένη συχνότητα των 31372.55 Hz, καθώς η Quantel δε διεξάγει μετρήσεις για όλες τις συχνότητες. Σε περίπτωση λοιπόν που ο χρήστης επιθυμεί να γνωρίζει ακριβή στοιχεία μετρήσεων, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί παλμός των 20kHz ή 50kHz ή 100kHz, η παραγωγή του οποίου μπορεί να γίνει π.χ. με τη χρήση γεννήτριας τετραγωνικών παλμών.

4.3.2 Συνδέσεις SUB-D25

Στον παρακάτω πίνακα ορίζονται τα 25 pins του SUB-D25 του συστήματος laser:

Αριθμός	Περιγραφή pin	Σχόλια
1,2,3,4,5,6,7,8	Ρύθμιση ισχύος D0 έως D7	<p>TTL 5V σήμα εισόδου που καθορίζει την ισχύ εξόδου του laser.</p> <p>Το λιγότερο σημαντικό bit LSB (D0) αντιστοιχεί στο pin 1, ενώ το σημαντικότερο bit MSB (D7) αντιστοιχεί στον ακροδέκτη 8.</p> <p>Η ισχύς διαιρείται σε 256 επιλεγόμενα επίπεδα.</p> <p>Η μέγιστη ισχύς εξόδου επιτυγχάνεται όταν όλα τα bits 1-8 είναι σε υψηλό επίπεδο TTL.</p> <p>Εσωτερικά περιλαμβάνεται μία pull-down αντίσταση σε κάθε pin.</p>
9	Διακόπτης ρύθμισης ισχύος	<p>TTL 5V σήμα εισόδου το οποίο επικυρώνει τις ρυθμίσεις της ισχύος εξόδου που καθορίζονται από τα pins 1 έως 8.</p> <p>Οι ρυθμίσεις ισχύος καταγράφονται στην πτώση της τάσης. Αν ο διακόπτης ρύθμισης της ισχύος διατηρείται σε υψηλό TTL επίπεδο, η οπτική ισχύς εξόδου του laser ακολουθεί τις ρυθμίσεις ηλεκτρικής ισχύος στα pins 1 έως 8.</p> <p>Εσωτερικά περιλαμβάνεται μία pull-down αντίσταση σε κάθε pin.</p>
10,11,12,13,14	Γείωση	Οι ηλεκτρικές και μηχανικές γειώσεις συνδέονται εσωτερικά μεταξύ τους.
15	Alarm σήματος συγχρονισμού	Σήμα εξόδου 5V TTL που πληροφορεί σχετικά με τη συμφωνία του σήματος

		<p>εισόδου συγχρονισμού:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Ότι το σήμα συγχρονισμού είναι στο σωστό εύρος λειτουργίας του ρυθμού επανάληψης και - ότι το σήμα συγχρονισμού χρησιμοποιεί το σωστό επίπεδο TTL. <p>Ένα υψηλό επίπεδο TTL αντιστοιχεί σε κανονική λειτουργία, ενώ η χαμηλή στάθμη TTL αντιστοιχεί σε alarm.</p> <p>Η ισχύς εξόδου του laser κλείνει αυτόματα όταν εμφανίζεται ένα alarm.</p>
16	Alarm ταλαντωτή	<p>Σήμα εξόδου 5V TTL που πληροφορεί για την κατάσταση του ταλαντωτή.</p> <p>Υψηλό επίπεδο TTL αντιστοιχεί σε alarm. Το alarm αυτό σημαίνει ότι η θερμοκρασία του ταλαντωτή είναι εκτός εύρους λειτουργίας ή/και η ισχύς εξόδου του ταλαντωτή είναι πολύ χαμηλή.</p> <p>Η ισχύς εξόδου laser κλείνει αυτόματα όταν εμφανιστεί ένα alarm.</p> <p>Χαμηλό επίπεδο TTL αντιστοιχεί σε μια κανονική λειτουργία.</p>
17	Εξωτερική παροχή ισχύος 5V για την ακτίνα στόχευσης (προαιρετικό)	Τροφοδοσία 5V , μέγιστο φορτίο 0.15A.
18	Ενεργοποίηση ταλαντωτή	<p>TTL 5V σήμα εισόδου που ενεργοποιεί και απενεργοποιεί τον ταλαντωτή.</p> <p>Υψηλό επίπεδο TTL ενεργοποιεί τον ταλαντωτή, ενώ ένα χαμηλό TTL τον απενεργοποιεί.</p> <p>Εσωτερικά περιλαμβάνεται μία pull-down αντίσταση.</p>

19	Ενεργοποίηση laser (στάδιο ενισχυτή)	<p>TTL 5V σήμα εισόδου που ενεργοποιεί και απενεργοποιεί τον ενισχυτή.</p> <p>Υψηλό επίπεδο TTL ενεργοποιεί τον ενισχυτή (μόνο αν το στάδιο ταλαντωτή είναι ήδη ενεργοποιημένο), ενώ ένα χαμηλό TTL επίπεδο τον απενεργοποιεί. Το σήμα εισόδου θα μπορούσε να είναι διαμορφωμένο.</p> <p>Εσωτερικά περιλαμβάνεται μία pull-down αντίσταση.</p>
20	Σήμα συγχρονισμού	<p>TTL 5V σήμα εισόδου το οποίο καθορίζει το ρυθμό επανάληψης του laser.</p> <p>Η Quantel συνιστά τη χρήση τετραγωνικού σήματος. Ο συγχρονισμός γίνεται στην ακμή ανόδου της τάσης. Το ελάχιστο επίπεδο υψηλού / χαμηλού TTL είναι 100 ns. Εάν το σήμα είναι εκτός εύρους, συμβαίνει ένα alarm και το laser κλείνει αυτόματα.</p> <p>Εσωτερικά περιλαμβάνεται μία pull-down αντίσταση.</p>
21	Alarm θερμοκρασίας	<p>TTL 5V σήμα εξόδου που πληροφορεί σχετικά με τη θερμοκρασία λειτουργίας.</p> <p>Υψηλό επίπεδο TTL σημαίνει ότι το laser είναι σε κανονική λειτουργία, ενώ χαμηλό επίπεδο TTL σημαίνει ότι το alarm θερμοκρασίας έχει ενεργοποιηθεί. Το alarm ενεργοποιείται όταν η θερμοκρασία λειτουργίας είναι εκτός εύρους. Το λέιζερ κλείνει αυτόματα όταν προκύπτει αυτός ο συναγερμός.</p>
22	Ενεργοποίηση ακτίνας στόχευσης (προαιρετικό)	<p>TTL 5V σήμα εισόδου το οποίο επιτρέπει την ενεργοποίηση / απενεργοποίηση της ακτίνας στόχευσης.</p> <p>Υψηλό επίπεδο TTL ενεργοποιεί την ακτίνα, ενώ ένα χαμηλό επίπεδο TTL την</p>

		<p>απενεργοποιεί. Αν ενεργοποιηθεί το pin αυτό, ενώ το laser είναι ενεργοποιημένο, το laser κλείνει και ενεργοποιείται η κόκκινη δέσμη στόχευσης.</p> <p>Εσωτερικά περιλαμβάνεται μία pull-down αντίσταση.</p>
23	Διακοπή έκτακτης ανάγκης	<p>TTL 5V σήμα εισόδου που επιτρέπει τη διακοπή του laser σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης.</p> <p>Υψηλό επίπεδο TTL αντιστοιχεί σε κανονική λειτουργία, ενώ το χαμηλό επίπεδο TTL αντιστοιχεί σε ένα σήμα έκτακτης ανάγκης. Όταν συμβαίνει σήμα έκτακτης ανάγκης το laser κλείνει αυτόματα.</p> <p>Εσωτερικά περιλαμβάνεται μία pull-down αντίσταση.</p>
24	Alarm ανακλώμενης ισχύος	<p>TTL 5V σήμα εξόδου που πληροφορεί σχετικά με το επίπεδο της ανακλώμενης ισχύος.</p> <p>Υψηλό επίπεδο TTL αντιστοιχεί σε πολύ υψηλή ανακλώμενη ισχύ· το alarm ενεργοποιείται, ενώ η χαμηλή στάθμη TTL αντιστοιχεί σε κανονική λειτουργία.</p> <p>Όταν ενεργοποιείται ο συναγερμός, το laser απενεργοποιείται αυτόματα.</p>
25	Παρακολούθηση ισχύος εξόδου	<p>Αναλογικό σήμα εξόδου, ανάλογο με την ισχύ εξόδου που έχει τεθεί. Το ρεύμα εξόδου είναι μεταξύ 4 και 20 mA.</p>

Πίνακας 4.3 : Συνδέσεις SUB-D25

Συνδέσεις των εισόδων του SUB-D25

Τέλος, στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι συνδέσεις των βασικών εισόδων που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της διατριβής:

<u>Pin εισόδου</u>	<u>Σύνδεση</u>
1 έως 8	Μόνιμη σύνδεση στα 5V του τροφοδοτικού. Σαν αποτέλεσμα, το laser δίνει τη μέγιστη ισχύ του.
9	Μόνιμη σύνδεση στα 5V του τροφοδοτικού. Έτσι, επικυρώνεται η ρύθμιση ισχύος που έχουμε επιλέξει.
17	Μόνιμη σύνδεση στα 5V του τροφοδοτικού. Τροφοδοσία της κόκκινης ακτίνας στόχευσης.
22	Σύνδεση στο pin 3 των εξόδων 24V PMAC 8 IN/OUT Board, μέσω voltage regulator.
18, 19	Σύνδεση στο pin 4 των εξόδων 24V PMAC 8 IN/OUT Board, μέσω voltage regulator. Η απαιτούμενη χρονοκαθυστέρηση των 40ms γίνεται από τα ενσωματωμένα ηλεκτρονικά, οπότε δεν είναι απαραίτητο να γίνει από το χρήστη.
20	Σύνδεση στο pin 5 του Arduino (PWM), με σκοπό την παροχή τετραγωνικού σήματος συγχρονισμού.

Πίνακας 4.3: Συνδέσεις βασικών εισόδων

Ακολουθεί μια πιο λεπτομερής περιγραφή των σημαντικότερων pins του SUB-D25:

Pins 1-8

Τα pin από 1 έως 8 του laser είναι 5V TTL (Transistor- Transistor Logic) και χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν την ισχύ εξόδου του laser. Η ισχύς εξόδου χωρίζεται σε 256 επίπεδα. Το πιο σημαντικό pin είναι το pin 8 ενώ το λιγότερο σημαντικό είναι το pin 1. Ως παράδειγμα, παρατίθενται οι παρακάτω ακολουθίες bits:

Pin 1	Pin 2	Pin 3	Pin 4	Pin 5	Pin 6	Pin 7	Pin 8	Σχόλια
0	0	0	0	0	0	0	1	50% της ισχύος
0	0	0	0	0	0	1	1	75% της ισχύος

Πίνακας 4.4: Συνδέσεις SUB-D25

Pin 20 - Σήμα συγχρονισμού

Η είσοδος συγχρονισμού χρησιμοποιείται για να συγχρονίσει το ρυθμό επανάληψης με τις απαιτήσεις του συστήματος.

Η διάρκεια του οπτικού παλμού είναι ανεξάρτητη από τη διάρκεια του ηλεκτρονικού παλμού (στην περίπτωση μας ο ηλεκτρονικός παλμός είναι 15.87μsec). Εξαρτάται μόνο από το ρυθμό επανάληψης. Συμπεραίνουμε λοιπόν, πως την ενέργεια του οπτικού παλμού εξόδου την καθορίζουμε μέσω του PRR αλλά και των pin 1 έως 8.

Το σήμα συγχρονισμού πρέπει να ενεργοποιηθεί πριν την ενεργοποίηση των σημάτων του ταλαντωτή και του ενισχυτή.

Αν το σήμα συγχρονισμού είναι μικρότερο ή μεγαλύτερο από τα αποδεκτά όρια ή είναι μηδενικό ενώ το σήμα ενεργοποίησης του ταλαντωτή ή/και του ενισχυτή είναι ενεργοποιημένα, παράγεται ένα σήμα συναγερμού (συναγερμός σήματος συγχρονισμού, pin 15) και το laser κλείνει αυτόματα.

Το σήμα εισόδου πρέπει να είναι **τετραγωνικό** ενώ η διάρκεια του παλμού πρέπει να είναι τουλάχιστον 100ns για να ληφθεί υπόψιν. Πρέπει επίσης να σέβεται τη μέγιστη και ελάχιστη αποδεκτή συχνότητα του laser, η οποία κυμαίνεται από 20 έως 100kHz.

Στην παρούσα εργασία, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω επιλέχθηκε συχνότητα 31372.55Hz, ενώ το μήκος του κάθε παλμού είναι 15.87μsec.

Pin 18 και 19 - Ενεργοποίηση ταλαντωτή και ενισχυτή

Το pin ενεργοποίησης του ταλαντωτή ελέγχει την τροφοδοσία του σταδίου του ταλαντωτή. Αν συνδεθεί σε λογικό HIGH και δεν υπάρχουν alarms, ενεργοποιείται το στάδιο του ταλαντωτή.

Το pin ενεργοποίησης του ενισχυτή ελέγχει την τροφοδοσία του. Με τη σύνδεση του στο λογικό HIGH, απαιτούνται δύο συνθήκες για να επιτραπεί η λειτουργία του laser. Πρέπει να έχει ενεργοποιηθεί πρώτα ο ταλαντωτής και να μην υπάρχουν alarms.

Pin 22 - Ενεργοποίηση ακτίνας στόχευσης

Όπως αναφέρθηκε στον πίνακα των pins του SUB-D25, αν ενεργοποιηθεί το pin αυτό, ενώ το laser είναι ενεργοποιημένο, το laser κλείνει και ενεργοποιείται η κόκκινη δέσμη στόχευσης. Αυτό σημαίνει πως το laser δε μπορεί να λειτουργήσει ταυτόχρονα με την κόκκινη δέσμη, ενώ η κόκκινη δέσμη έχει προτεραιότητα.

Pin 23 - Διακοπή έκτακτης ανάγκης

Το emergency stop πρέπει να συνδέεται στο λογικό HIGH. Σε περίπτωση που γίνει LOW, διακόπτεται η εσωτερική τροφοδοσία του laser. Το pin αυτό χρησιμοποιείται για λόγους ασφαλείας, όπως το άνοιγμα της πόρτας της περιοχής ασφαλείας, ατύχημα κ.λ.π.

Σημείωση: Τα στάδια του ταλαντωτή και του ενισχυτή πρέπει να ενεργοποιηθούν ξανά, ύστερα από το πάτημα του emergency stop.

Pins 15, 16, 21 και 24 - Alarms

Το alarm συγχρονισμού (pin 15) ενεργοποιείται όταν το σήμα συγχρονισμού είναι μικρότερο ή μεγαλύτερο από τα αποδεκτά όρια ή είναι μηδενικό. Το alarm είναι ενεργό για LOW της τάσης 5V TTL.

Το alarm ταλαντωτή (pin 16) ενεργοποιείται όταν η θερμοκρασία του ταλαντωτή είναι εκτός ορίων ή/και η ισχύς εξόδου του ταλαντωτή είναι χαμηλή ή/και όταν το laser είναι στη διαδικασία προθέρμανσης. Το alarm είναι ενεργό για HIGH της τάσης 5V TTL.

Το alarm θερμοκρασίας (pin 21) ενεργοποιείται όταν η εσωτερική θερμοκρασία είναι εκτός ορίων. Το alarm είναι ενεργό για LOW της τάσης 5V TTL.

Το alarm θερμοκρασίας (pin 24) ενεργοποιείται όταν η ισχύς που επιστρέφει λόγω ανακλάσεων είναι υψηλή. Το alarm είναι ενεργό για HIGH της τάσης 5V TTL.

Pin 25 - Παρακολούθηση της ισχύος εξόδου

Η παρακολούθηση της ισχύος εξόδου είναι μια αναλογική έξοδος η οποία δίνει ένα ρεύμα ανάλογο της ενεργοποίησης των 8 pin καθορισμού της ισχύος εξόδου.

4.4 Χειρισμός του laser και επίλυση προβλημάτων [18]

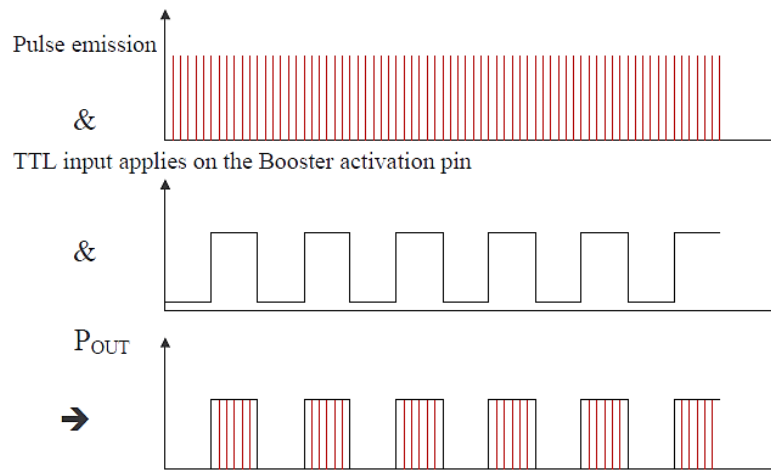
Διαδικασία ενεργοποίησης του laser

Πέραν των συνδέσεων στο SUB-D25, είναι πολύ σημαντικό να γνωρίζουμε την αλληλουχία των κινήσεων κατά την εκκίνηση αλλά και τον τερματισμό του laser, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η ορθή λειτουργία του. Η παρακάτω διαδικασία αφορά τις συνδέσεις στο SUB-D25, ενώ το USB δε συμμετέχει στη διαδικασία ενεργοποίησης του laser. Η σύνδεση του αφορά μόνο την παρακολούθηση της κατάστασης του laser.

Εκκίνηση του laser

- Ανοίξτε τη γενική τροφοδοσία ισχύος των +24V και περιμένετε έως ότου τελειώσει ο χρόνος προθέρμανσης (περίπου 40sec). Κατά τη διάρκεια του χρόνου προθέρμανσης, ενεργοποιείται το alarm του ταλαντωτή (pin 16).
- Ανοίξτε το σήμα εξωτερικού συγχρονισμού (pin 20).
- Καθορίστε την ισχύ εξόδου του laser με τη σύνδεση των 5V TTL (Transistor-Transistor Logic) pin 1 έως 8. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το πιο σημαντικό pin είναι το pin 8 ενώ το λιγότερο σημαντικό είναι το pin 1. Εφόσον το 8-μπιτο σήμα είναι σταθερό, μπορείτε να καταγράψετε την ισχύ εξόδου, τοποθετώντας έναν παλμό 5V TTL στο “pin μανταλωτή ρύθμισης ισχύος” (pin 9). Αν το pin αυτό κρατηθεί στο υψηλό επίπεδο 5V TTL, η ισχύς εξόδου ακολουθεί την ισχύ που έχει τεθεί στα pin 1 έως 8.
- Τοποθετήστε το pin 18 (pin ενεργοποίησης ταλαντωτή) στα 5V TTL. Παράγεται μια υπολειμματική οπτική ισχύς από το laser στην έξοδο της οπτικής κεφαλής (μέση ισχύς < 10mW). Το laser απαιτεί 40msec για να σταθεροποιήσει την ισχύ εξόδου του ταλαντωτή, πριν την ενεργοποίηση του σταδίου booster. Η καθυστέρηση αυτή είναι ενσωματωμένη στα ηλεκτρονικά. Κατά τη διάρκεια της καθυστέρησης αυτής, το booster δε μπορεί να ενεργοποιηθεί.
- Τοποθετήστε το pin ενεργοποίησης booster (pin 19) στα 5V. Το pin αυτό μπορεί να ρυθμιστεί. Η συχνότητα ρύθμισης δίνεται στις προδιαγραφές του laser. Το

φως το οποίο εκπέμπεται, γίνεται επικίνδυνο ακόμη και από ανακλάσεις. Πρέπει λοιπόν να έχουν παρθεί μέτρα προστασίας.



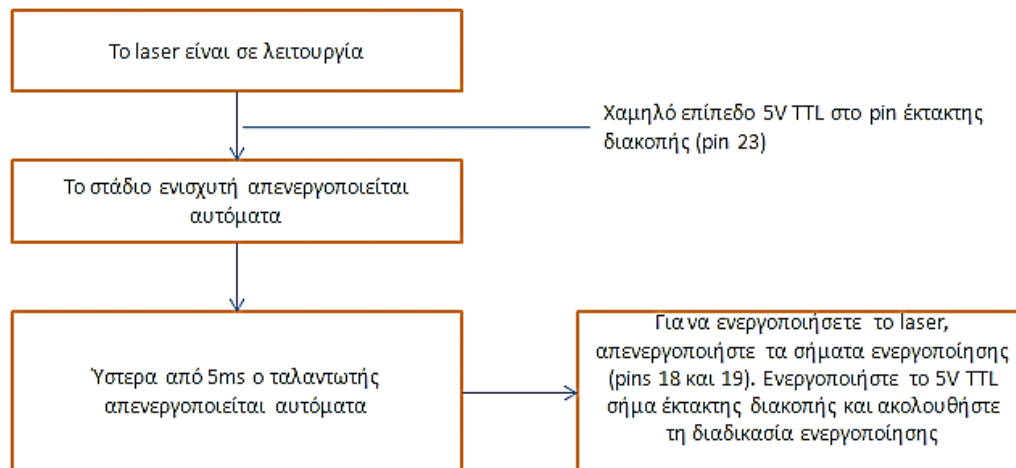
Σχήμα 4.12: Χρήση της εισόδου ενεργοποίησης booster. Το booster είναι ON μόνο όταν το TTL επίπεδο είναι υψηλό. Το booster ενισχύει το σήμα του ταλαντωτή μόνο όταν το επίπεδο TTL είναι υψηλό.

Τερματισμός του laser

- Τοποθετείστε το pin ενεργοποίησης booster (pin 19) σε χαμηλό επίπεδο 5V TTL. Παράγεται μια υπολειμματική ισχύς εξόδου από την έξοδο της οπτικής κεφαλής (μέση ισχύς < 10mW).
- Τοποθετείστε το pin ενεργοποίησης ταλαντωτή (pin 18) σε χαμηλό επίπεδο 5V TTL.
- Ένα σήμα 8 bits "00000000" μπορεί να τοποθετηθεί στα pins 1 έως 8, έτσι ώστε να τεθεί η ισχύς εξόδου στο 0 (η πράξη αυτή δεν είναι απαραίτητη για τον τερματισμό της λειτουργίας του laser).
- Απενεργοποιήστε το pin σήματος συγχρονισμού (pin 20).
- Αποσυνδέστε την παροχή ισχύος των 24V.

Σημείωση: Όσον αφορά την εσωτερική λειτουργία και τη λειτουργία επίδειξης, ο χρήστης που πιθανώς επιλέξει έναν από τους τρόπους αυτούς, μπορεί να ανατρέξει στο manual του YLIA M20 για τη ρύθμιση των παραμέτρων.

Διαδικασία έκτακτης διακοπής



Σχήμα 4.13: Διάγραμμα έκτακτης διακοπής

Χειρισμός της κόκκινης ακτίνας στόχευσης

Για την ενεργοποίηση της κόκκινης ακτίνας είναι απαραίτητα 2 σήματα:

- 5V εξωτερικής παροχής ισχύος στο pin 17 (pin τροφοδοσίας). Το pin αυτό πρέπει να συνδεθεί στα $5 \pm 0.25V$, με μέγιστο ρεύμα τροφοδοσίας 0.15A.
- Ένα σήμα ενεργοποίησης 5V TTL στο pin 22

Με την εξωτερική τροφοδοσία των 5V, ο χρήστης μπορεί να κάνει χρήση της κόκκινης ακτίνας στόχευσης ενώ η τροφοδοσία του laser είναι απενεργοποιημένη. Η κόκκινη ακτίνα του laser δε μπορεί να απενεργοποιηθεί χρησιμοποιώντας το λογισμικό ελέγχου. Επίσης, η διαδικασία για την ενεργοποίηση/απενεργοποίηση της κόκκινης ακτίνας είναι η ίδια ανεξάρτητα από τον τρόπο λειτουργίας που έχουμε επιλέξει.

Συνδέσεις laser

Κάνετε τις ακόλουθες συνδέσεις στο SUB-D25:

Αριθμός	Περιγραφή pin	Κατάσταση
10,11,12,13,14	Γείωση	Γείωση
17	Εξωτερική τροφοδοσία 5V για τη στόχευση	5V με max 0.15A
22	Ενεργοποίηση κόκκινης ακτίνας στόχευσης	Χαμηλό επίπεδο 5V TTL

Πίνακας 4.4: Συνδέσεις SUB-D25

Διαδικασία ενεργοποίησης της κόκκινης ακτίνας στόχευσης

- Ενεργοποιήστε την εξωτερική τροφοδοσία των + 5V στο pin 17 του SUB-D25.
- Ενεργοποιήστε την κόκκινη ακτίνα στόχευσης με ένα υψηλό επίπεδο 5V TTL στο pin 22 του SUB-D25.
- Η κόκκινη ακτίνα ενεργοποιείται στην έξοδο της οπτικής κεφαλής.

Σημείωση: Δεν απαιτείται η ενεργοποίηση της γενικής τροφοδοσίας των +24V για την ενεργοποίηση της κόκκινης ακτίνας.

Διαδικασία απενεργοποίησης της κόκκινης ακτίνας

- Απενεργοποιήστε την ακτίνα με ένα χαμηλό επίπεδο 5V TTL στο pin 22 του SUB-D25.
- Η ακτίνα στόχευσης απενεργοποιείται στην οπτική κεφαλή.
- Απενεργοποιήστε την +5V εξωτερική τροφοδοσία στο pin 17 του SUB-D25.

Σημείωση: Η τροφοδοσία +5V πρέπει να είναι συνδεδεμένη κατά την περίοδο λειτουργίας του συστήματος.

Alarm κόκκινης ακτίνας στόχευσης

Alarm της κόκκινης ακτίνας στόχευσης συμβαίνει όταν ενεργοποιείται το pin 22 (pin ενεργοποίησης της κόκκινης ακτίνας), ενώ η τροφοδοσία της ακτίνας (pin 17) έχει αποσυνδεθεί.

Σημείωση: Το alarm αυτό είναι ορατό μόνο στο λογισμικό ελέγχου του YLIA M20.

Αντιμετώπιση προβλημάτων

Υπάρχουν 4 alarms τα οποία είναι δυνατόν να ενεργοποιηθούν κατά τη χρήση του laser:

- Alarm ταλαντωτή (pin 16)
- Alarm θερμοκρασίας (pin 21)
- Alarm σήματος συγχρονισμού (pin 15)
- Alarm (pin 24)

Η ενεργοποίηση ενός εκ των παραπάνω alarms, οδηγεί στην αυτόματη απενεργοποίηση του laser. Για την εκ νέου ενεργοποίηση του, πρέπει να σβήσει το alarm (η τιμή της παραμέτρου πρέπει να επιστρέψει στο εύρος της κανονικής λειτουργίας) και τα σήματα ενεργοποίησης (του ταλαντωτή και του ενισχυτή) πρέπει να απενεργοποιηθούν. Έτσι:

Όταν το laser είναι ενεργοποιημένο, τα alarms μένουν ενεργοποιημένα μέχρι:

- Η παράμετρος που είναι εκτός εύρους επιστρέφει στο κανονικό εύρος λειτουργίας.
- Τα σήματα ενεργοποίησης του ταλαντωτή και του ενισχυτή (pin 18 και pin 19) απενεργοποιούνται.

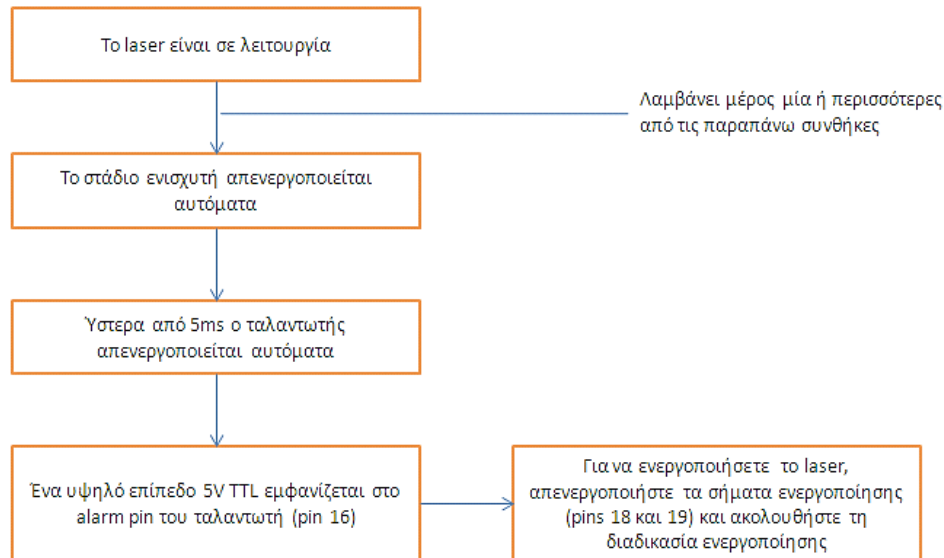
Όταν το laser είναι απενεργοποιημένο (δηλαδή τα στάδια του ταλαντωτή και του ενισχυτή), τα alarms μένουν ενεργοποιημένα μέχρι η παράμετρος να επιστρέψει στο κανονικό εύρος λειτουργίας.

Alarm ταλαντωτή

Το alarm ταλαντωτή συμβαίνει όταν συμβαίνει ένα ή περισσότερα από τα παρακάτω:

- Η ισχύς 1 του ταλαντωτή είναι κάτω από το κατώφλι που έχει τεθεί εργοστασιακά.

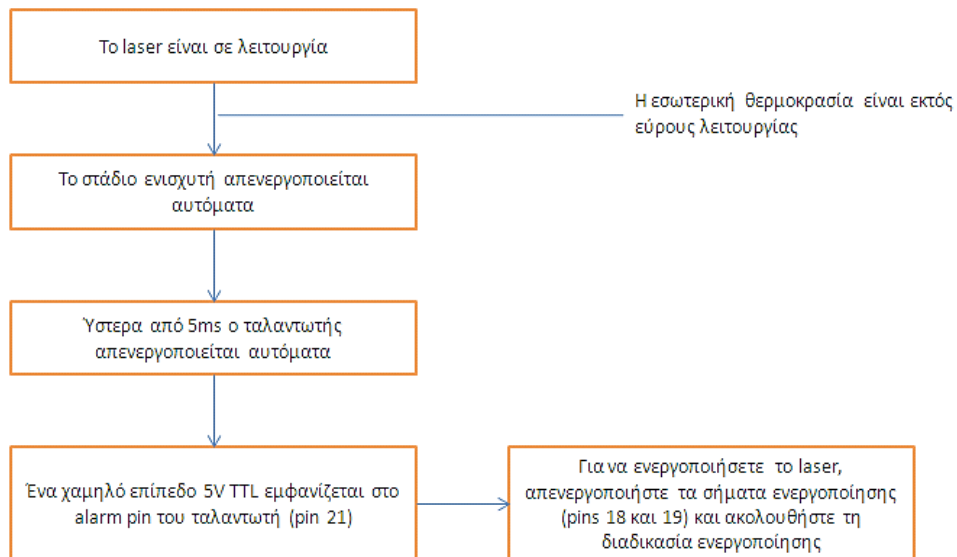
- Η ισχύς εξόδου του ταλαντωτή είναι κάτω από το κατώφλι που έχει τεθεί εργοστασιακά.
- Η θερμοκρασία του ταλαντωτή βγαίνει εκτός του 0.5°C γύρω από τη θερμοκρασία ρύθμισης του ταλαντωτή.
- Η θερμοκρασία του ταλαντωτή βγαίνει εκτός του 0.5°C γύρω από τη θερμοκρασία ρύθμισης του ταλαντωτή για περισσότερα από 20 sec.



Σχήμα 4.14: Διάγραμμα alarm ταλαντωτή

Alarm θερμοκρασίας

Το alarm θερμοκρασίας συμβαίνει όταν η εσωτερική θερμοκρασία είναι εκτός του εύρους κανονικής λειτουργίας (5°C έως 53°C).

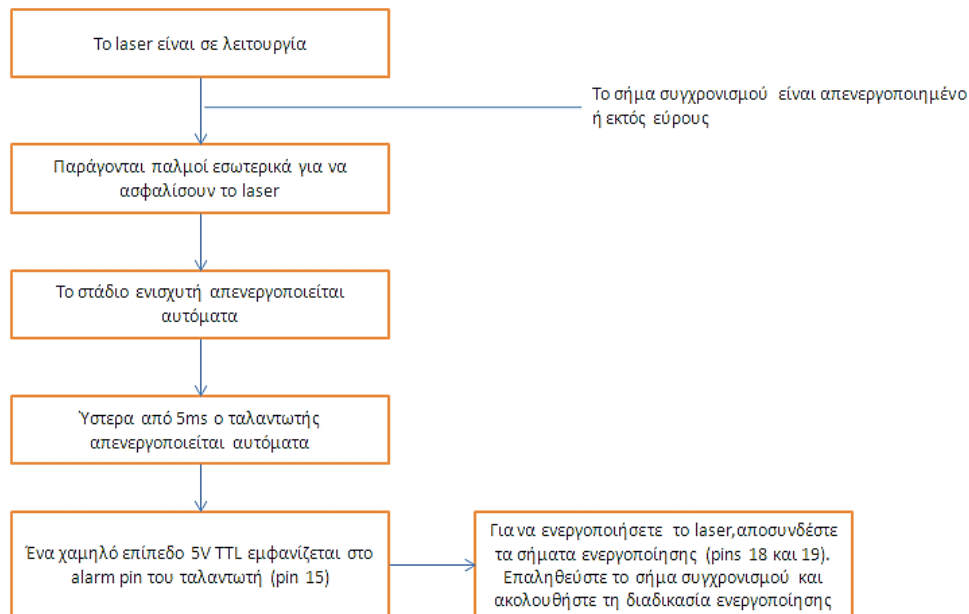


Σχήμα 4.15: Διάγραμμα alarm θερμοκρασίας

Alarm σήματος συγχρονισμού

Το alarm αυτό ενεργοποιείται όταν ένα ή περισσότερα από τα παρακάτω είναι αληθή:

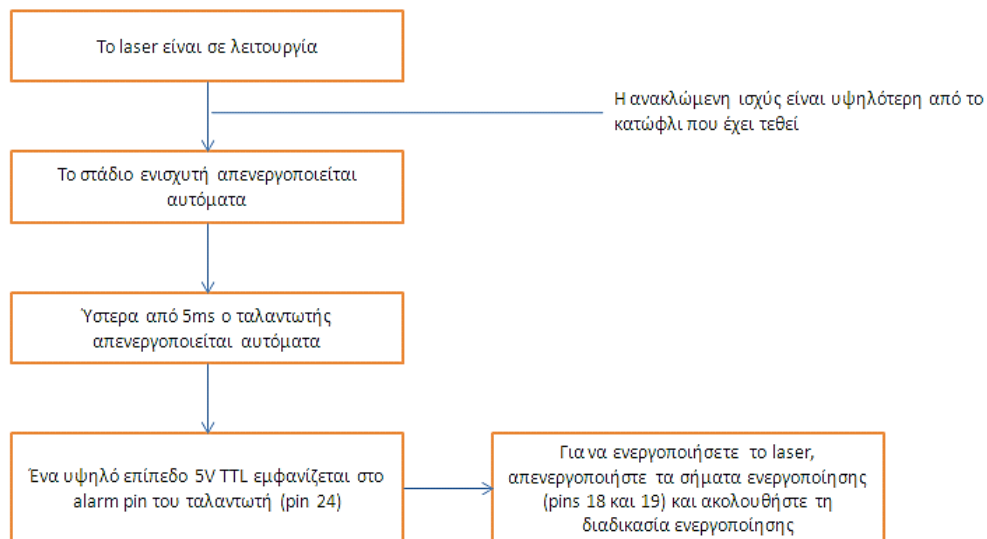
- Το σήμα συγχρονισμού δεν είναι παρόν.
- Το σήμα συγχρονισμού είναι σε χαμηλό ή υψηλό επίπεδο TTL.
- Ο ρυθμός επανάληψης του σήματος συγχρονισμού είναι εκτός του ρυθμού επανάληψης που δίνεται στις προδιαγραφές.



Σχήμα 4.16: Διάγραμμα alarm σήματος συγχρονισμού

Alarm ανακλώμενης ισχύος

Το alarm αυτό συμβαίνει όταν το ποσό της ανακλώμενης ισχύος μέσω της οπτικής κεφαλής είναι υψηλότερο από το κατώφλι που έχει τεθεί.

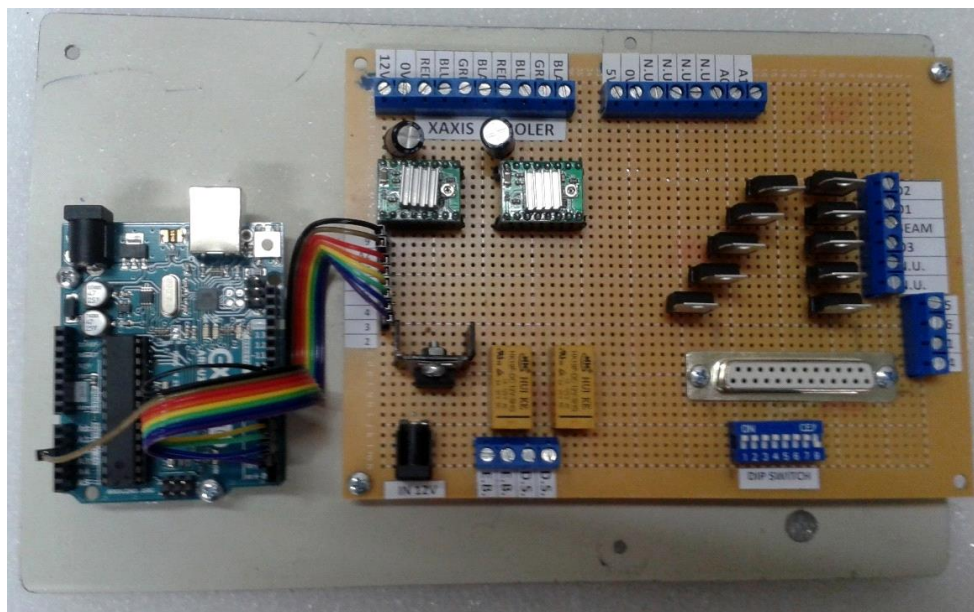


Σχήμα 4.17: Διάγραμμα alarm ανακλώμενης ισχύος

Κεφάλαιο 5: Συνολική υλοποίηση

5.1 Διάταξη ελέγχου

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η συνολική διάταξη ελέγχου βηματικών κινητήρων και laser:



Εικόνα 5.1: Διάταξη ελέγχου βηματικών κινητήρων και laser

5.2 Συνολικός κώδικας Arduino

Ο συνολικός κώδικας του Arduino για τη λειτουργία των δύο βηματικών κινητήρων και του laser είναι ο παρακάτω:

```
#include <AccelStepper.h>
#define ENABLE_XAXIS 13
#define ENABLE_ROLLER 10
#define OutPin 9;                                     // Το pin 9 δίνει τον τετραγωνικό παλμό
int RIGHT = analogRead(A0);
int LEFT = analogRead(A1);
```



```

int OPEN = analogRead(A2);
AccelStepper Xaxis(1, 12, 11);          /* Θέτουμε το pin 12 ως step και το pin
                                         11 ως direction
                                         Εδώ το sleep είναι το pin 13 */
AccelStepper Roller(1, 5, 8);          /* Θέτουμε το pin 9 ως step και το pin 8
                                         ως direction
                                         Εδώ το sleep είναι το pin 10*/
int spd = 800;                          // Η τρέχουσα ταχύτητα σε steps/sec

int sign ;                              // 1, 0 ή -1
void setup()
{
  Xaxis.setMaxSpeed(1500);              // Μέγιστη ταχύτητα(steps/sec)
  Roller.setMaxSpeed(1500);
  pinMode(ENABLE_XAXIS,OUTPUT);         // Θέτουμε το pin 13 ως έξοδο
  pinMode(ENABLE_ROLLER,OUTPUT);        // Θέτουμε το pin 10 ως έξοδο
  pinMode(OutPin,OUTPUT);
  TCCR1B = TCCR1B & 0b11111000 | 0x01;
}
void loop()
{
  analogWrite(OutPin, 127);              // Duty cycle περίπου 50%
  if (OPEN > 900){
    if (LEFT > 900 && RIGHT < 900){
      sign = -1;
      digitalWrite(ENABLE_XAXIS,HIGH);
      digitalWrite(ENABLE_ROLLER,HIGH);
    }
    if (LEFT < 900 && RIGHT > 900){
      sign = 1;
      digitalWrite(ENABLE_XAXIS,HIGH);
      digitalWrite(ENABLE_ROLLER,HIGH);
    }
  }
  if (RIGHT <= 900 && LEFT <= 900){
    sign = 0;
    digitalWrite(ENABLE_XAXIS,LOW);
    digitalWrite(ENABLE_ROLLER,LOW);
  }
  Xaxis.setSpeed((-1)*sign * spd);
  Roller.setSpeed((-1)*sign * spd/8);
}

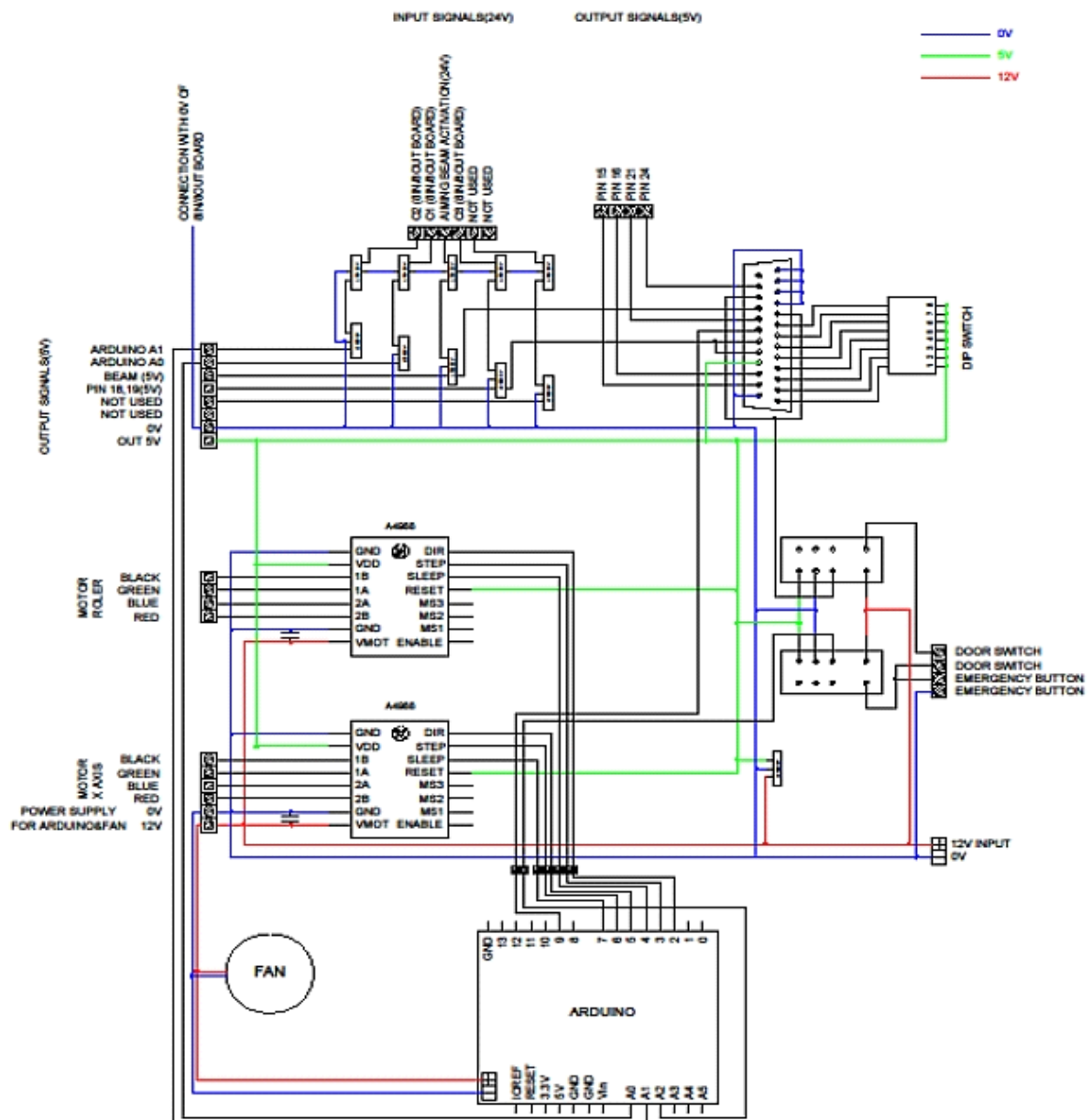
```

```

Axis.runSpeed();
Roller.runSpeed();

```

Τέλος παρατίθεται το σχέδιο (σε AutocAD) της διάταξης ελέγχου βηματικών κινητήρων και laser στο οποίο φαίνονται όλες οι συνδέσεις μεταξύ των επιμέρους στοιχείων του κυκλώματος.



Εικόνα 5.2: Σχέδιο της διάταξης ελέγχου βηματικών κινητήρων και laser

Όπως φαίνεται και στο σχέδιο, έγινε χρήση δύο ρελέ για τον έλεγχο της λειτουργίας του laser και των κινητήρων από το door switch ο οποίος βρίσκεται στην πόρτα της μηχανής και το emergency stop, το οποίο βρίσκεται στο πλαϊνό τμήμα της μηχανής. Πιο συγκεκριμένα, το πάνω ρελέ χρησιμοποιείται για το διακόπτη της πόρτας, ενώ το κάτω για το emergency stop.

Οι βασικές συνδέσεις των ρελέ περιγράφονται στους παρακάτω πίνακες, ενώ ακολουθεί και λεπτομερής ανάλυση της λειτουργίας τους:

Πρώτος ακροδέκτης τροφοδοσίας	12V
Δεύτερος ακροδέκτης τροφοδοσίας	Door Switch
Normally Open	5V
Normally Closed	Γείωση (GND)
Common	Pin 9 και 23 του laser

Πίνακας 5.1: Ρελέ Door Switch

Πρώτος ακροδέκτης τροφοδοσίας	12V
Δεύτερος ακροδέκτης τροφοδοσίας	Door Switch, Emergency Button
Normally Open	5V
Normally Closed	Γείωση (GND)
Common	Pin A2 του Arduino

Πίνακας 5.2: Ρελέ Emergency Stop

- Ρελέ Door Switch

Όπως φαίνεται και στους παραπάνω πίνακες, οι δύο ακροδέκτες της τροφοδοσίας του ρελέ door switch, συνδέονται στα 12V και στο door switch. Οι υπόλοιπες 3 επαφές συνδέονται (από αριστερά προς τα δεξιά, όπως φαίνεται στο σχέδιο): Στα 5V, στη γείωση (GND), στα pin 9 και 23 του laser. Στον διακόπτη της πόρτας έχουμε συνδέσει το Normally Open και το Common. Κατά συνέπεια, όταν η πόρτα είναι κλειστή, τα pin 9 και 23 του laser συνδέονται στα 5V και το laser λειτουργεί κανονικά, ενώ αν για κάποιο λόγο ανοίξει η πόρτα, το ρελέ σταματά να είναι οπλισμένο με συνέπεια να σταματήσει το laser.

- Ρελέ Emergency Stop

Όμοια με το ρελέ Door Switch, οι δύο ακροδέκτες της τροφοδοσίας του ρελέ, συνδέονται στα 12V και στο emergency stop. Επίσης, οι υπόλοιπες 3 επαφές

συνδέονται (από αριστερά προς τα δεξιά, όπως φαίνεται στο σχέδιο): Στα 5V, στη γείωση (GND), στα pin A₂ του Arduino. Στο κουμπί έκτακτης διακοπής έχουμε συνδέσει το Normally Closed και το Common. Έτσι, όταν το emergency stop δεν είναι πατημένο, το A₂ είναι σε κατάσταση HIGH με συνέπεια να λειτουργεί ο κώδικας του Arduino που ενεργοποιεί τους βηματικούς κινητήρες, καθώς εισέρχεται στο βρόχο που επιθυμούμε. Όταν το emergency stop πατηθεί, **σταματά η λειτουργία των βηματικών κινητήρων αλλά και του laser** καθώς το Emergency Button καθορίζει την τροφοδοσία του ρελέ του Door Switch, όπως φαίνεται και στο σχέδιο.

Η λογική των παραπάνω συνδέσεων είναι η εξής: Αν κάποιος ανοίξει κατά λάθος την πόρτα, πρέπει να σταματήσει αμέσως το laser για λόγους προστασίας. Το Emergency Button αφορά τη συνολική λειτουργία της μηχανής και αφορά σε κάποιο πρόβλημα που μπορεί να έχει προκύψει, για αυτό και με το πάτημα του απενεργοποιείται και το laser και οι βηματικοί αλλά και οι σερβοκινητήρες της μηχανής. Η διαδικασία διακοπής της λειτουργίας των σερβοκινητήρων περιγράφεται αναλυτικά στη διατριβή του Φ. Ρογάρη [27].

Σημείωση: Όπως φαίνεται και στο σχέδιο, η κοινή γείωση του Arduino με τα υπόλοιπα στοιχεία της διάταξης ελέγχου των βηματικών κινητήρων και του laser, συνδέεται με τη γείωση του 8 IN/OUT BOARD. Αυτό γίνεται έτσι ώστε τα σήματα των 24V από το 8 IN/OUT BOARD σε 5V στις εισόδους A₀ και A₁ του Arduino, να έχουν ως αναφορά το 8 IN/OUT BOARD.

Επίσης, το επίπεδο ενέργειας του laser, ελέγχεται από τους διακόπτες DIP SWITCH που φαίνονται στο παραπάνω σχέδιο.

5.3 Λειτουργία και δοκιμές

Με την ολοκλήρωση της κατασκευής και παραμετροποίησης της μηχανής, μπορούμε πλέον να τη θέσουμε σε λειτουργία για να ελέγξουμε πως όλες οι επί μέρους διατάξεις αφενός λειτουργούν αρμονικά και ομαλά, από μηχανολογικής άποψης, αφετέρου ότι συνεργάζονται, για μια ολοκληρωμένη κίνηση, σύμφωνα και με το πρόγραμμα που εκτελείται. Εφόσον όλα λειτουργούν σωστά, πρέπει να γίνει παραμετροποίηση της διάταξης σύμφωνα με τις εκάστοτε απαιτήσεις. Οι βασικές παράμετροι αναλύονται στη διατριβή του Φ. Ρογάρη [27] και είναι οι ακόλουθες:

- Μεταβλητές I, μεταβλητές ενισχυτή Faldic, για τη λειτουργία των σερβοκινητήρων (X,Y,Z άξονες).
- Μεταβλητές M, για την κίνηση του μηχανισμού εναπόθεσης σκόνης και τη λειτουργία του laser.

Για την κίνηση του μηχανισμού εναπόθεσης σκόνης μέσω των βηματικών κινητήρων, καθώς και τη λειτουργία του laser απαιτείται ξεχωριστό πρόγραμμα, πέραν αυτού που εκτελείται στον ελεγκτή Pmac, που αποθηκεύεται και εκτελείται στον ελεγκτή Arduino, και το οποίο περιγράφηκε πρωτύτερα στην παρούσα διατριβή.

Στη συνέχεια αναφέρονται συνοπτικά τα βήματα που πρέπει να ακολουθήσουμε για την ενεργοποίηση και λειτουργία της μηχανής, τα οποία έχουν αναλυθεί στη διπλωματική του Φ. Ρογάρη [27]:

- Ενεργοποίηση υπολογιστή και επεξεργαστή Pmac.
- Τροφοδοσία ενισχυτών σερβοκινητήρων, διάταξης Pmac CUIF, 8IN/8OUT BOARD, διάταξης ελέγχου βηματικών κινητήρων και laser, πηγής laser.
- Εκκίνηση της εφαρμογής PEWIN32PRO.
- Αποθήκευση προγράμματος στον επεξεργαστή Pmac.
- Εκτέλεση προγράμματος.

Για τη λειτουργία της διάταξης δε θα πρέπει να είναι ενεργοποιημένος ο διακόπτης έκτακτης ανάγκης τύπου 'μανιταριού', ενώ ο διακόπτης της πόρτας δεν έχει επίδραση στις κινήσεις, αλλά μόνο στην ενεργοποίηση/απενεργοποίηση της δέσμης laser.

Στην επόμενη ενότητα περιγράφεται ένα πρόγραμμα που περιέχει όλες τις λειτουργίες που μπορούν να εκτελεστούν από την τελική διάταξη.

5.4 Εκτέλεση προγραμμάτων G-κώδικα

Όπως έχει αναφερθεί, ο επεξεργαστής Pmac μπορεί να εκτελέσει και προγράμματα G-κώδικα. Η βασική δομή του κώδικα που πρέπει να είναι η εξής:

- Ορισμός συστήματος συντεταγμένων.
- Ορισμός κινητήρων-αξόνων και διαβάθμισή τους.
- Κύριος κώδικας, για την κίνηση των X,Y,Z αξόνων

- Ενδιάμεση χρήση των μεταβλητών M208, M209 για την κίνηση του μηχανισμού εναπόθεσης σκόνης.
- Ενδιάμεση χρήση της μεταβλητής M210, για την ενεργοποίηση/απενεργοποίηση της δέσμης laser.

Πριν την εκτέλεση των προγραμμάτων, βρέθηκαν οι θέσεις HOME των κινητήρων των X,Y,Z αξόνων, ενώ οι θέσεις της αρχής των αξόνων της κεφαλής laser έχουν προσαρμοστεί βάσει της θέσης της τράπεζας κατασκευής.

5.5 Κίνηση X,Y,Z αξόνων και μηχανισμού εναπόθεσης σκόνης

Για τις ανάγκες της δοκιμής, τοποθετήθηκε μια επιφάνεια ξύλου πάνω στο τραπέζι κατασκευής, όπου χαράχθηκε με τη δέσμη laser ένα τετράγωνο διαστάσεων 50x50mm με τις διαγωνίους του. Καθώς δεν έχει κατασκευαστεί το δοχείο αποθήκευσης σκόνης, η κίνηση του άξονα Z, καθώς και του μηχανισμού εναπόθεσης σκόνης δεν ήταν απαραίτητη, αλλά περιλαμβάνεται στον κώδικα που ακολουθεί για λόγους δοκιμής και επεξήγησης του τρόπου λειτουργίας.

```
//***** Set-up and Definitions
*****

UNDEFINE ALL
&1 //Ορισμός συστήματος συντεταγμένων 1
#1->4096X //Ορισμός κινητήρα 1 ως άξονα X, με μισή περιστροφή να
+409600 //αντιστοιχεί σε 1mm, και
//offset 100mm(4096*100)
#2->4096Y //Ορισμός κινητήρα 2 ως άξονα Y
#4->54613.33Z //Ορισμός κινητήρα 4 ως άξονα Z
OPEN PROG 1 //Άνοιγμα καταχωρητή για εισαγωγή προγράμματος,
//Πρόγραμμα #1
CLEAR //Διαγραφή υπάρχοντος περιεχομένου του καταχωρητή
G17 G90 //XY επίπεδο, κίνηση σε απόλυτες συντεταγμένες

//M200 είναι η μεταβλητή στην οποία καταχωρείται η
//κατάσταση του LEFT SWITCH
//M200=0 ενεργοποιημένος διακόπτης, M200=1
//απενεργοποιημένος
//M201 είναι η μεταβλητή στην οποία καταχωρείται η
//κατάσταση του RIGHT SWITCH
//M201=0 ενεργοποιημένος διακόπτης, M201=1
//απενεργοποιημένος
//M208 είναι η μεταβλητή με την οποία
```

```
//ενεργοποιούμε(M208=1)και απενεργοποιούμε(M208=0) το
//pinA0(Arduino) για κίνηση μηχανισμού εναπόθεσης //σκόνης
δεξιά
//M209 είναι η μεταβλητή με την οποία
//ενεργοποιούμε(M209=1)και απενεργοποιούμε(M209=0) το
//pinA1(Arduino) για κίνηση μηχανισμού εναπόθεσης //σκόνης
αριστερά
//M210 είναι η μεταβλητή με την οποία
//ενεργοποιούμε(M210=1)και απενεργοποιούμε(M210=0) τη
//δέσμη laser
```

```
//***** Κίνηση τραπεζιού κατασκευής και εναπόθεση μιας στρώσης σκόνης
*****
```

```
F10 //Ταχύτητα 10 mm/min
G1 Z-1 //Μετακίνηση του τραπεζιού κατασκευής κατά 1mm
//αρνητικά
DWEELL10 //Αναμονή 10msec( για να ενεργοποιηθεί η έξοδος του
//8IN/8OUT Board)
M208=1 //Ενεργοποίηση pinA0(Arduino) για κίνηση μηχανισμού
//εναπόθεσης σκόνης δεξιά
While (M201 = 1) //Αναμονή μέχρι να ενεργοποιηθεί ο RIGHT SWITCH
WAIT
EndWhile
DWEELL10 //Αναμονή 10msec
M208=0 //Απενεργοποίηση pinA0(Arduino) για τερματισμό //κίνησης
μηχανισμού εναπόθεσης σκόνης
```

```
//***** ενεργοποίηση και κίνηση κεφαλής laser *****
```

```
G01 X0 F200 //Γραμμική κίνηση στο σημείο X0, με ταχύτητα 200mm/min
DWEELL 10 //Αναμονή 10msec
M210=1 //Ενεργοποίηση δέσμης laser
G01 X50 //Γραμμική κίνηση στο σημείο X50
G01 Y50 //Γραμμική κίνηση στο σημείο Y50
G01 X0 //Γραμμική κίνηση στο σημείο X0
G01 Y0 //Γραμμική κίνηση στο σημείο Y0
DWEELL 10 //Αναμονή 10msec
M210=0 //Απενεργοποίηση δέσμης laser
```

```
//***** κίνηση τραπεζιού κατασκευής και εναπόθεση μιας στρώσης σκόνης
*****
```

```
F10 //Ταχύτητα 10 mm/min
G1 Z-2 //Μετακίνηση του τραπεζιού κατασκευής στο Z=-2
DWEELL10 //Αναμονή 10msec
M209=1 //Ενεργοποίηση pinA1(Arduino) για κίνηση μηχανισμού
//εναπόθεσης σκόνης αριστερά
```

```

While (M200 = 1) //Αναμονή μέχρι να ενεργοποιηθεί ο LEFT SWITCH
WAIT
EndWhile
DWEELL10          //Αναμονή 10msec
M209=0            //Απενεργοποίηση pinA1(Arduino) για τερματισμό κίνησης
                  //μηχανισμού εναπόθεσης σκόνης

//***** ενεργοποίηση και κίνηση κεφαλής laser *****

DWEELL10          //Αναμονή 10msec
M210=1            //Ενεργοποίηση δέσμης laser
G01 X50 Y50       //Γραμμική κίνηση στο σημείο X50 Y50 με ταχύτητα 200
F200              //mm/min
DWEELL 10         //Αναμονή 10msec
M210=0//LASER     //Απενεργοποίηση δέσμης laser
OFF
G01 Y0            //Γραμμική κίνηση στο σημείο Y0
DWEELL10          //Αναμονή 10msec
M210=1            //Ενεργοποίηση δέσμης laser
G01 X0 Y50        //Γραμμική κίνηση στο σημείο X0 Y50
DWEELL 10         //Αναμονή 10msec
M210=0            //Απενεργοποίηση δέσμης laser
G01 Y0            //Γραμμική κίνηση στο σημείο Y0

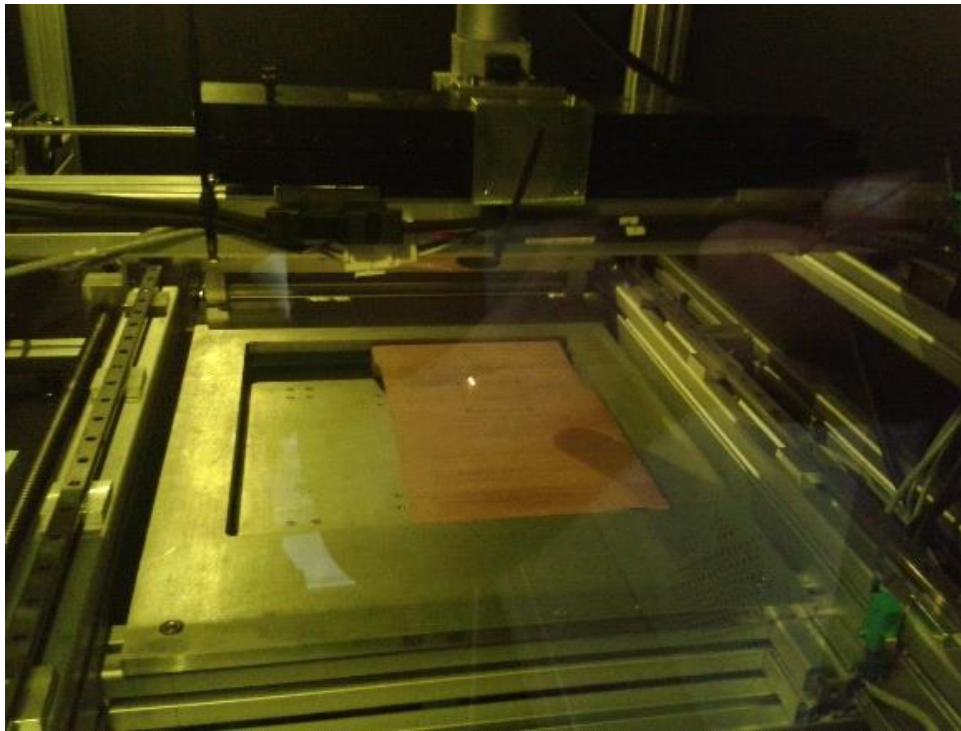
//***** Επαναφορά τραπεζιού κατασκευής στη θέση Z=0
*****

F10               //Ταχύτητα 10 mm/min
G1 Z0             //Μετακίνηση του τραπεζιού κατασκευής στην αρχική του
                  //θέση (Z0)

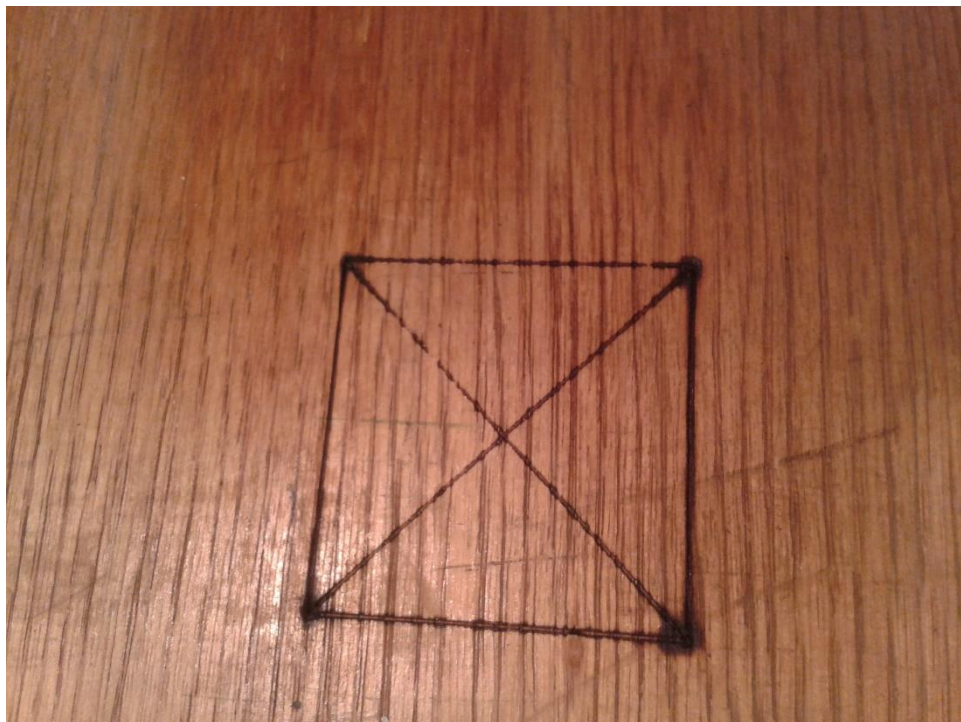
M30              //Τέλος προγράμματος
CLOSE            //Κλείσιμο καταχωρητή

```

Στις φωτογραφίες που ακολουθούν φαίνεται ένα στιγμιότυπο από την κατεργασία ενώ η δέσμη είναι ενεργοποιημένη, το τελικό αποτέλεσμα στην επιφάνεια του ξύλου καθώς και ένα παράδειγμα δοκιμής της μηχανής.



Εικόνα 5.3: Στιγμιότυπο από την κατεργασία



Εικόνα 5.4: Τελικό αποτέλεσμα δοκιμής



Εικόνα 5.5: Παράδειγμα δοκιμής

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία

Συμπεράσματα

Στα πλαίσια της διατριβής κατέστη εφικτή η μετακίνηση του συστήματος απλώματος σκόνης χωρίς την παρουσία ανάδρασης, μέσω της χρήσης βηματικών κινητήρων, τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των οποίων μπορούν να μεταβληθούν εύκολα, από το λογισμικό του Arduino.

Επίσης, το σύστημα του laser ελέγχεται πλήρως ως προς τα χαρακτηριστικά του, δίνοντας στο χρήστη τη δυνατότητα επιλογής και καθορισμού διαφόρων παραμέτρων του. Πιο συγκεκριμένα, μέσω των διακοπών DIP SWITCH είναι δυνατή η επιλογή μεταξύ 256 διαφορετικών επιπέδων ισχύος εξόδου, έτσι ώστε αυτή να προσαρμόζεται στις ανάγκες τις κάθε εφαρμογής. Επιπλέον, παρέχονται 3 διαφορετικοί τρόποι λειτουργίας του laser, η εξωτερική λειτουργία, η εσωτερική λειτουργία και η λειτουργία επίδειξης, γεγονός που παρέχει ευελιξία ως προς τον έλεγχο αλλά και την επισκόπηση της κατάστασης του laser.

Μελλοντικές επεκτάσεις

Τα επόμενα βήματα αφορούν στην παραμετροποίηση του συστήματος laser ως προς την εκπεμπόμενη ενέργεια ανάλογα με το υλικό της σκόνης αλλά και ως προς την απόσταση από το επίπεδο της σκόνης, με στόχο τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας τήξης και πυροσυσσωμάτωσης.

Επίσης, προβλέπεται ο χειρισμός των επιπέδων ενέργειας του laser από το πρόγραμμα και όχι από το DIP SWITCH που χρησιμοποιείται μέχρι στιγμής.

Βιβλιογραφία

- 1 Βικιπαίδεια, Arduino, 2016, el.wikipedia.org/wiki/Arduino, (Τελευταία πρόσβαση 12/02/2016)
- 2 www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno, (Τελευταία πρόσβαση 12/02/2016)
- 3 www.arduino.cc/en/Tutorial/SecretsOfArduinoPWM, (Τελευταία πρόσβαση 12/02/2016)
- 4 playground.arduino.cc/Code/PwmFrequency, (Τελευταία πρόσβαση 12/02/2016)
- 5 Π.Χ. Παπαγεωργίου, .Μελέτη και κατασκευή ηλεκτρομηχανικής διάταξης για επίστρωση ηλεκτροδίου σε στερεό ηλεκτρολύτη για εφαρμογή σε κυψέλες καυσίμου., Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2014
- 6 Γ. Κ. Αναγνωστόπουλος, Σχεδίαση αυτοελεγχόμενων ηλιακών συστημάτων, Διπλωματική εργασία, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, 2010
- 7 T. Kenjo, A. Sugawara, 'Stepping Motors and Their Microprocessor Controls' (2nd edition), Oxford Science Publications, Oxford, 1994
- 8 P. P. Acarnley, Stepping Motors: A Guide to Modern Theory and Practice (4th edition), IET Control Engineering Series 63, 2007
- 9 Αχιλλέας Βαΐρης, Σημειώσεις Βιομηχανικά Συστήματα Ελέγχου – Βιβλιοθήκη ΤΕΙ Κρήτης, 2016, www.lib.teiher.gr/webnotes/stef/Biomixanika_systimata_elenxou/stepper.pdf (Τελευταία πρόσβαση 12/02/2016)
- 10 www.nmbtc.com/step-motors/engineering/construction-and-operating-theory/ (Τελευταία πρόσβαση 12/02/2016)
- 11 www.pololu.com/product/2128 (Τελευταία πρόσβαση 12/02/2016)
- 12 M. McCauley, 'AccelStepper library for Arduino', 2016, www.airspayce.com/mikem/arduino/AccelStepper/ (Τελευταία πρόσβαση 12/02/2016)
- 13 Μ. Μπενής, Φυσική των Laser, 2013 http://users.uoi.gr/mbenis/index_files/Classes/LASER_ALL.pdf (Τελευταία πρόσβαση 12/02/2016)
- 14 Βικιπαίδεια – Λέιζερ, 2016, el.wikipedia.org/wiki/Λέιζερ (Τελευταία πρόσβαση 12/02/2016)

- 15 M. Μπενής, Φυσική των Laser, 2013,
ecourse.uoi.gr/pluginfile.php/87951/mod_resource/content/14/LASER-CH1.pdf
(Τελευταία πρόσβαση 12/02/2016)
- 16 Σ. Κότπου, Τα laser και οι εφαρμογές τους - 6. Είδη laser και οι χαρακτηριστικές
τους ιδιότητες, 2008 <http://panacea.med.uoa.gr/topic.aspx?id=908> (Τελευταία
πρόσβαση 12/02/2016)
- 17 G. Jacobs, 'Understanding Spot Size for Laser Scanning', 2006, hds.leica-
geosystems.com/hds/en/Prof_Surv_Spot_Size_Oct06.pdf (Τελευταία πρόσβαση
12/02/2016)
- 18 Quantel, YLIA M20 and M10 User's manual, 2008
- 19 A. Hughes, 'Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications'
(3rd edition), Elsevier Ltd, 2006
- 20 P. P. Acarnley, 'Stepping motors: a guide to theory and practice', IEE control
engineering series, Vol,. 63, : Institution of Electrical Engineers, 2002.
- 21 I.S. Kinstlinger, A. Bastian, S.J. Paulsen, D.H. Hwang, A.H. Ta, D.R. Yalacki, T.
Schmidt, J.S. Miller, "Open-Source Selective Laser Sintering (OpenSLS) of Nylon
and Biocompatible Polycaprolactone", PLoS ONE 11:2, 2016, p.25.
- 22 A. Budding. T.H.J. Vaneker, A.J.A. Winnubst, "Open source powder based rapid
prototyping machine for ceramics", Procedia CIRP, 6, 2013, pp. 533 - 538.
- 23 G. C. Anzalone, C. Zhang, B. Wijnen, P.G. Sanders, J.M. Pearce, "Low-Cost Open-
Source Metal 3-D Printer", IEEE Access, Vol 1, 2013, pp.803-810.
- 24 Ν. Κοντολάτης, 'Βασικός σχεδιασμός μηχανής προσθετικής κατασκευής με
επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση μέσω ακτίνας laser', Τεχνική Έκθεση, Τομέας
Τεχνολογίας των Κατεργασιών, ΕΜΠ, Φεβρουάριος 2012.
- 25 Α. Μπουρνιάς, "Σχεδιασμός μηχανισμού εναπόθεσης σκόνης για
εργαλειομηχανή SLS/SLM", Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανολόγων
Μηχανικών, ΕΜΠ, 2013.
- 26 Α.Π.Μιχελής, "Ανάπτυξη Ψηφιακά Καθοδηγούμενης Διάταξης Δύο
Καρτεσιανών Αξόνων Κίνησης, για εργαλειομηχανή προσθετικής κατασκευής
τεμαχίων κατά στρώσεις τύπου SLS/SLM", Μεταπτυχιακή Διατριβή, ΔΠΜΣ
Συστήματα Αυτοματισμού, ΕΜΠ, 2012.
- 27 Φ. Ρογάρης: "Κατασκευή μηχανής επιλεκτικής τήξης-πυροσυσσωμάτωσης με
laser (SLS-SLM): Ηλεκτρομηχανολογικά μέρη και έλεγχος κινήσεων",
Μεταπτυχιακή Διατριβή, ΔΠΜΣ Συστήματα Αυτοματισμού, ΕΜΠ, 2016.
- 28 N. Hopkinson, R. Hague, P. Dickens, Rapid Manufacturing: An Industrial

Revolution for the Digital Age, Wiley, 2005

- 29** D.S. Kim, S.W. Bae, K.-H. Choi, "Development of industrial SFF system using dual laser and optimal process", *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 23:6, 2007, pp.659-666.
- 30** J. Yang, H. Ouyang, Y. Wang, "Direct metal laser fabrication: machine development and experimental work", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 46, 2010, pp.1133–1143.
- 31** J. Jose, R. Amuthakkannan, "Design, Development and Analysis of FDM based Portable Rapid Prototyping Machine", *International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology (IJLTET)*, Vol 4, 2014, p.10.
- 32** F.E. Wiria, N. Sudarmadji, K.F. Leong, C.K. Chua, E. W. Chng, C.C. Chan, "Selective laser sintering adaptation tools for cost effective fabrication of biomedical prototypes", *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 16: 2, 2010, pp.90 - 99